

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MIGUEL RIBEIRO MUGUIO

AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO CONCRETO COMPACTADO
COM ROLO (CCR) COM BASE NAS ANOMALIAS DA GRAVIDADE: ESTUDO DE
CASO: BARRAGEM DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ

CURITIBA

2018

MIGUEL RIBEIRO MUGUIO

AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO CONCRETO COMPACTADO
COM ROLO (CCR) COM BASE NAS ANOMALIAS DA GRAVIDADE: ESTUDO DE
CASO: BARRAGEM DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

Coorientador: Prof. Dr. Francisco José
Fonseca Ferreira

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE
BIBLIOTECAS/UFPR BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA

M951a

Muguio, Miguel Ribeiro

Avaliação da variação da densidade do concreto compactado com rolo (CCR) com base nas anomalias da gravidade: estudo de caso: barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá / Miguel Ribeiro Muguio. – Curitiba, 2018.

108 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2018.

Orientador: Pedro Luis Faggion.

Coorientador: Francisco José Fonseca Ferreira.

1. Anomalias da gravidade. 2. Densidade. 3. Concreto compactado a rolo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luis. III. Ferreira, Francisco José Fonseca. IV. Título.

CDD: 526.3

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MIGUEL RIBEIRO MUGUIO** intitulada: **AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) COM BASE NAS ANOMALIAS DA GRAVIDADE. ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 21 de Fevereiro de 2018.



PEDRO LUIS FAGGION
Presidente da Banca Examinadora



ISABELLA FRANÇOSO REBUTINI FIGUEIRA
Avaliador Externo



GABRIEL DO NASCIMENTO GUIMARÃES
Avaliador Externo



CARLOS AURÉLIO NADAL
Avaliador Externo



SÍLVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS
Avaliador Interno

Dedico esta tese aos meus pais Paula Ribeiro e Natal Zembe Muguio, pela guia à busca de conhecimentos; à minha esposa Paula Celeste Chongo e aos meus filhos, Cleide, Ivanilsson (Ivany) e Breiner (Dany), pela paciência e coragem.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a vida, força, coragem e oportunidade para que esta etapa fosse alcançada com sucessos.

Aos meus pais Paula Ribeiro e Natal Muguio por me terem orientado desde infância a uma vida acadêmica dedicando todos os seus esforços para que tal fosse possível, apesar de neste momento já não se encontrarem mais entre nós.

A minha esposa Paula Celeste Chongo, pelo incentivo, pela paciência, confiança e acima de tudo coragem por me ter permitido atravessar o atlântico a busca de conhecimentos enquanto ela sozinha tomava conta dos nossos filhos e de outras atividades familiares.

Aos meus filhos Cleide Paula Miguel Muguio, Ivanilsson Miguel Muguio e Breiner Miguel Muguio que por causa da tenra idade sempre perguntaram ao pai porque é que não estuda aqui em Moçambique? Mas, mesmo assim souberam compreender, esperar e se comportar na ausência do pai.

Aos meus irmãos em geral que sempre me deram o apoio moral que tanto necessitei.

Ao Professor Doutor Pedro Luis Faggion, por me ter acolhido, orientado, partilharmos algumas experiências profissionais e desenvolvermos uma grande amizade. Pela disponibilidade imediata sempre que o solicitei uma deslocação ao campo para realizar levantamentos. Pelo apoio que tem estado a prestar para que o INFATEC possa introduzir o curso superior de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Ao Professor Doutor Francisco José Fonseca Ferreira, por ter aceitado coorientar-me e permitir desenvolver conhecimentos e habilidades em matérias relacionadas à geofísica.

Ao Professor Doutor Wander da Cruz e sua esposa Glória, pela grande amizade, disponibilidade imediata em apoiar em todas as campanhas de campo, discussões de ideias e acomodação em Telêmaco Borba (Município onde se localiza a barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá).

A família Cruz representada nomeadamente pelo senhor Geraldo e sua esposa Selmira, senhor Casimiro e sua esposa Lenir (pais e avós do Professor Doutor Wander da Cruz), pelo acolhimento e acomodação em sua casa em Telêmaco Borba.

Ao Geólogo MSc Rodoilton Stevanato do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Paraná (LPGA/UFPR), pelo apoio de campo nos levantamentos e discussões de ideias durante o processamento dos dados de eletroresistividade.

Ao Professor Doutor Sílvio Rogério Correia de Freitas, por ter aceitado participar da banca de qualificação, da tese de doutorado e pelas valiosas discussões que contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim com sucesso.

Ao Professor Doutor Carlos Aurélio Nadal, por ter aceitado fazer parte da banca da tese de doutorado e pelas valiosas discussões que contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim com sucesso.

A Doutora Isabella Françoço Rebutini Figueira, por ter aceitado fazer parte da banca da tese de doutorado e pelas valiosas discussões que contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim com sucesso.

Ao Professor Doutor Gabriel do Nascimento Guimarães, por ter aceitado fazer parte da banca da tese de doutorado e pelas valiosas discussões que contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim com sucesso.

Ao Professor Doutor Luís Augusto Koenig Veiga, por me permitir assistir algumas disciplinas na graduação e pelo apoio que tem estado a prestar para que o Instituto de Formação e Administração de Terras e Cartografia (INFATEC) possa introduzir o curso superior de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Ao Professor Doutor Jorge Centeno pelo apoio moral e incentivo com algumas ideias relativas a criação do curso superior de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Ao Professor MSc Jeffersson Ulisses pelo apoio no processamento dos dados gravimétricos.

Ao Ministério da Agricultura (MINAG), atualmente Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar (MASA) de Moçambique, pela concessão da bolsa de estudo quando o INFATEC, instituição na qual sou Professor e Pesquisador, se subordinava a este.

Ao dr. Paulo Azevedo da Graça, ex-Diretor Nacional dos Recursos Humanos do MINAG, pelo apoio prestado na organização dos documentos relativos a bolsa de estudo.

Ao Ministério da Terra Ambiente e Desenvolvimento Rural (MITADER), que deu continuidade aos processos de pagamento da minha bolsa de estudo, quando o INFATEC passou a subordinar-se a este.

Ao INFATEC por todo tipo de apoio disponibilizado e em particular a atual diretora, dr^a Anselmina Maliphola que não poupou esforços na busca de soluções para que a minha última bolsa de estudo fosse paga.

Ao Engenheiro Alexandre Uisse pelo incentivo e apoio moral.

Aos Laboratórios de Geodésia Aplicada à Engenharia, LaIG e LabTOPO pelo empréstimo dos materiais e equipamentos que possibilitaram a realização de várias pesquisas.

A Doutora Isabella Figueira por disponibilizar algumas imagens necessárias para esta tese.

A Professora Doutora Cláudia Robbi pelo contato mantido e envio de documentações para que a minha vinda ao PPGCG da UFPR fosse possível.

A Mônica, secretária do PPGCG da UFPR, pelo apoio no contato com a coordenação.

Aos colegas e ex-colegas do PPGCG: Alyne, Evelin, Mário, Ilich, José, Andrea, Andreas, Niarkios, Dayane, Marinalva, Suzana, Henry e todos os outros que de uma ou de outra forma contribuíram para que eu pudesse chegar ao fim desse curso com sucesso.

A todos os amigos e compatriotas moçambicanos estudantes e ex-estudantes em Curitiba, em particular ao André Fenias Moiane, Caisse Amisse e Francisco Pedro Soares de Lima pelo companheirismo e diversos tipos de apoio.

Ao Engenheiro Marcos Soares da COPEL por apoiar nos contactos de modo a tornar possível todas as campanhas de campo.

A COPEL por possibilitar a realização desta pesquisa na barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.

Aos Professores do PPGCG por terem transmitido de uma forma sábia os conhecimentos que me permitiram alcançar esta etapa.

RESUMO

Nesta pesquisa avaliou-se a variação da densidade do Concreto Compactado com Rolo (CCR) na barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, rio Tibagi, no estado do Paraná. Devido à característica porosa do CCR e às fissuras provocadas pelo calor de hidratação do cimento e movimentações higrotérmicas (retração e expansão) e, considerando também o contato permanente da água com a face de montante da barragem, admite-se a possibilidade de infiltração da água, que gradualmente poderá provocar variações na densidade do concreto. Estas variações podem ser detectadas e mapeadas pelas anomalias da gravidade, haja vista, estas resultarem de contrastes de densidades entre um corpo rochoso e sua vizinhança. Assim, foi utilizado o método gravimétrico para avaliar as variações da densidade do CCR e o método da eletroresistividade (caminhamento elétrico 2D) para estimar a extensão e profundidade das anomalias, bem como, para comparar os resultados deste, com os do método gravimétrico. Os resultados mostram que avaliando a densidade do CCR, as anomalias negativas na região nordeste (NE) da barragem podem configurar baixas densidades influenciadas pela presença de água em partes do túnel do desvio. Na região central, os baixos gravimétricos devem refletir principalmente a presença de água no vertedouro e, secundariamente, o concreto saturado. Por fim, os altos gravimétricos podem ser explicados pelo concreto menos saturado, ou por uma maior espessura de soleira de diabásio situado no maciço rochoso da fundação da barragem e também pelos diques de diabásio associados ao Arco de Ponta Grossa. Outra conclusão evidenciada nesta pesquisa refere-se à variação do nível do reservatório que influencia diretamente no valor da gravidade. Assim, a diminuição do valor da gravidade está relacionada com massa atrativa menor decorrente da diminuição do nível d'água no reservatório.

Palavras-chave: Anomalias da Gravidade; Densidade; Concreto Compactado a Rolo.

ABSTRACT

In this research the density variation of the Roll Compacted Concrete (RCC) was evaluated in the hydroelectric dam of Mauá, on the Tibagi River, in the state of Paraná. Due to the porous characteristic of RCC and the cracks caused by the cement hydratation heat and higrotermics movements (retraction and expansion), and also considering the permanent contact of the water with the dam upstream, there is a possibility of water infiltration, which gradually may cause variations in the density of the concrete. These variations can be detected and mapped by the gravity anomalies, probably; these are the result of densities contrasts between a rocky body and its neighbourhood. Thus, the gravimetric method was used to evaluate the CCR density variations and the electro resistivity method (2D electrical tracking) to estimate the extent and depth of the anomalies, as well as, to compare these results with those of the gravimetric method. The results show that by evaluating the RCC density, the negative anomalies in the nordest region (NE) on the dam can configure low densities by the presence of water in some locations of the deviation tunnel. In the central region, the low gravity should reflect mainly the presence of water in the spillway and, secondarily, the saturated concrete. Finally, the high gravity can be explained by the less saturated concrete, or for a greater thickness of the diabase sill situated on the rocky massif of the foundation of the dam and alsoby the diabase dykes associated with the Arc of Ponta Grossa. Another conclusion evidenced in this study refers to the variation of the reservoir level that directly influences the gravity value. Thus, the decrease in the value of the gravity variation is related with the less attractive mass caused by the decrease inside the reservoir water level.

Keywords: Gravity anomalies; Density; Roll Compacted Concrete.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VETOR GRAVIDADE a) POTENCIAL DE UM CORPO SÓLIDO b) FORÇA CENTRÍFUGA	23
FIGURA 2 - GRAVÍMETROS ABSOLUTO	26
FIGURA 3 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DA GRAVIDADE ABSOLUTA.....	26
FIGURA 4 - REDUÇÃO DA GRAVIDADE.....	29
FIGURA 5 - PLATÔ DE BOUGUER.....	30
FIGURA 6 - CORREÇÃO DE TERRENO.....	31
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DA TENDÊNCIA REGIONAL POR UMA CURVA POLINOMIAL SUAVE CONSTRUÍDA NO PERFIL DE GRAVIDADE OBSERVADA PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	35
FIGURA 8 - PRINCÍPIO DO MÉTODO ELÉTRICO INDICANDO OS ELETRODOS DE CORRENTE (AB), OS DE POTENCIAL (MN) E AS LINHAS DE CORRENTE E DE EQUIPOTENCIAL.....	38
FIGURA 9 - ARRANJO DIPOLO-DIPOLO COM OS ELÉTRODOS DE CORRENTE (AB) E DE POTENCIAL (MN).....	40
FIGURA 10 - PERFIL DE AQUISIÇÃO E REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE UM ARRANJO DIPOLO-DIPOLO.	41
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DO CCR NA CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM	43
FIGURA 12 - BARRAGEM DE WILLOW CREEK NOS EUA	46
FIGURA 13 - BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO.....	47
FIGURA 14 - VISTA GERAL DA UHE DE SALTO CAXIAS	48
FIGURA 15 - VISTA GERAL DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ.....	48
FIGURA 16 - ESQUERDA: GRAVÍMETRO SCINTREX CG-5 SOBRE O TRIPÉ. DIREITA: DETALHES DO TRIPÉ.	57
FIGURA 17 - VISTA GERAL DA LOCALIZAÇÃO DO SENSOR DO GRAVÍMETRO CG-5.....	58
FIGURA 18 - IMAGEM DA TELA FRONTAL DO GRAVÍMETRO CG-5.....	59
FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ	61

FIGURA 20 - ALINHAMENTO DAS CRISTAS E VALES NA REGIÃO DA BARRAGEM DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ	62
FIGURA 21 - GEOLOGIA ESTRUTURAL DA REGIÃO DA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ.....	63
FIGURA 22 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA ABSOLUTA MATERIALIZADA NO LAIG DA UFPR.....	64
FIGURA 23 - CIRCUITOS GRAVIMÉTRICOS: (a) CIRCUITO FECHADO; (b) LINHA ABERTA COM PONTO INICIAL E FINAL EM ESTAÇÕES DE ORDEM SUPERIOR; (c) SEQUÊNCIA DE LINHAS CONHECIDAS COMO SALTO DE RÃ.....	65
FIGURA 24 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE REFERÊNCIA RN-5: (a) LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO; (b) VISTA DA ESTAÇÃO.....	66
FIGURA 25 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS SOBRE A CRISTA NA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ.....	68
FIGURA 26 - BARRAGEM E REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS GRAVIMÉTRICOS À JUSANTE.....	69
FIGURA 27 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE GRAVIDADE NA CRISTA E DEGRAUS SOBRE A BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ	70
FIGURA 28 - GALERIAS DE INSPEÇÃO SUPERIOR E INFERIOR E PONTOS DE MONITORAMENTO NO INTERIOR DA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ	71
FIGURA 29 - PROJETO DE EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE.....	76
FIGURA 30 - TRANSMISSOR UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D).....	77
FIGURA 31 - RECEPTOR UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D).....	78
FIGURA 32 - RECEPTOR GNSS HIPER DA TOPCON	79
FIGURA 33 - SISTEMA GEODÉSICO LOCAL E O SISTEMA DA BARRAGEM	80
FIGURA 34 - MAPAS DE ANOMALIA BOUGUER: a) JUNHO 2017; b) DEZEMBRO 2016.	86
FIGURA 35 - MAPAS DE ANOMALIA RESIDUAL: a) JUNHO 2017; b) DEZEMBRO 2016.	87

FIGURA 36 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA CRISTA E NOS DEGRAUS A JUSANTE DA BARRAGEM – JUNHO DE 2017	88
FIGURA 37 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA CRISTA E NOS DEGRAUS A JUSANTE DA BARRAGEM – DEZEMBRO DE 2016	89
FIGURA 38 - VARIAÇÃO DA GRAVIDADE NA CRISTA COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIO	91
FIGURA 39 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA GALERIA SUPERIOR.....	92
FIGURA 40 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA GALERIA INFERIOR	93
FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA ANOMALIA RESIDUAL COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIO NA GALERIA SUPERIOR.....	94
FIGURA 42 - VARIAÇÃO DA ANOMALIA RESIDUAL COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIO NA GALERIA INFERIOR	95
FIGURA 43 - MODELO DE PROFUNDIDADE DA RESISTIVIDADE	97

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MASSA ESPECÍFICA MÉDIA DO CCR EM DIVERSAS OBRAS	49
QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO GRAVÍMETRO CG-5 DA SCINTREX	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DEFINIDORES DO SGR80	22
TABELA 2 –DENSIFICAÇÃO GRAVIMÉTRICA.....	67
TABELA 3 - DENSIDADE MÉDIA DE MATERIAIS	75
TABELA 4 - COORDENADAS DA CRISTA NO SISTEMA DA BARRAGEM	83
TABELA 5 - COORDENADAS DA GALERIA SUPERIOR NO SISTEMA DA BARRAGEM.....	84
TABELA 6 - COORDENADAS DA GALERIA INFERIOR NO SISTEMA DA BARRAGEM.....	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS	21
2.1.1 Sistemas de referência terrestres.....	21
2.1.2 Gravimetria	22
2.1.2.1 Medida da gravidade	25
2.1.2.2 Gravidade normal	27
2.1.2.3 Anomalia da gravidade.....	28
2.1.2.4 Redução da gravidade	28
2.1.2.5 Anomalia Bouguer	32
2.2 MÉTODO DA ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D) ...	37
2.2.1 Princípios dos métodos elétricos	37
2.2.2 Técnica de Inversão da Pseudoseção de Resistividade Aparente.....	42
2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR).....	42
2.3.1 Estruturas de CCR	43
2.3.2 Principais propriedades do CCR	49
2.3.3 Vantagens do uso do CCR em barragens.....	50
2.3.4 Ocorrência de danos em barragens de concreto	50
3 ESTADO DA ARTE	52
4 METODOLOGIA.....	57
4.1 MATERIAIS	57
4.2 LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ.....	61
4.2.1 Geologia estrutural da região da barragem	61

4.3 MÉTODOS	64
4.3.1 Implantação e ampliação da rede gravimétrica	64
4.3.1.1 Espaçamento entre as estações	72
4.3.2 Processamento dos dados gravimétricos	72
4.3.3 Levantamento de eletroresistividade	76
4.3.4 Transformação de coordenadas para o sistema da barragem	78
5 RESULTADOS	83
5.1 COORDENADAS NO SISTEMA DA BARRAGEM	83
5.2 MAPAS DE ANOMALIAS BOUGUER E RESIDUAL	85
5.3 PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA CRISTA E NOS DEGRAUS	88
5.3.1 Variação da gravidade na crista com o nível do reservatório	91
5.4 PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NAS GALERIAS	92
5.4.1 Variação de anomalia residual nas galerias	93
5.5 CAMINHAMENTO ELÉTRICO – MODELO DE PROFUNDIDADE	95
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
6.1 CONCLUSÕES	99
6.2 RECOMENDAÇÕES	100
REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

As anomalias da gravidade obtidas pelos levantamentos e reduções gravimétricas são ferramentas comuns ao geodesta, ao geólogo e ao geofísico, entre outros profissionais ligados as Geociências. Vanicek e Krakiwski (1982) afirmaram que é difícil distinguir onde é que a Geofísica termina e onde é que a Geodésia inicia. Esta ideia foi ressaltada por Gemael (2012) ao afirmar que a Geodésia estabelece um vínculo recíproco com a Geofísica e a Geodinâmica.

Para a Geofísica, a gravimetria atua na pesquisa de recursos naturais e para a Geodésia, na determinação das ondulações do geoide e do desvio da vertical, no estabelecimento dos sistemas verticais de referência, no monitoramento da subsidência do solo associado às variações de águas subterrâneas e condições meteorológicas, entre outras. Em primeira aproximação pode-se dizer que a Geodésia se preocupa com a Gravimetria em escala global, enquanto a Geofísica está mais interessada em determinações regionais e/ou locais. Mas as determinações gravimétricas feitas para Geodésia servem para ambas (GEMAEL, 2012 e DREWES, 2015).

A Geodésia através de suas técnicas de medição, que se caracterizam pela precisão milimétrica e/ou submilimétrica, tem motivado pesquisas intensas na área de Geodésia e Levantamentos Geodésicos da Universidade Federal do Paraná. Estas pesquisas têm sido desenvolvidas nas barragens das usinas hidrelétricas Bento Munhoz da Rocha (Foz do Areia), Governador Ney Braga (Segredo) Gemael e Faggion (1995), Governador José Richa (Salto Caxias) e mais recentemente na barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, no rio Tibagi (MUGUIO *et al.*, 2015).

As regiões onde são instaladas as barragens, principalmente com a formação de grandes lagos, são potencialmente sismogênicas e o estudo da subsidência do solo em suas vizinhanças, interessa, sobretudo, ao geofísico. A Geodésia, dada à elevada precisão de seus métodos de mensuração, tem condições de detectar tal subsidência e assim contribuir na elucidação do mecanismo que desencadeia a sismicidade (GEMAEL, 2012; GEMAEL e FAGGION, 1995).

O controle e segurança de uma barragem encontram-se na análise de seu comportamento estrutural, com base no monitoramento de um conjunto de variáveis

que descrevem as relações entre as ações e as respostas estruturais correspondentes, levando em consideração as propriedades dos materiais utilizados na construção (CASACA e HENRIQUES, 2002). Estas podem ser construídas em concreto, terra e enrocamento (COSTA, 2012).

A barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, que é objeto deste estudo, foi construída com a tecnologia CCR - Concreto Compactado a Rolo. Este possui os mesmos materiais que o concreto convencional, porém com dosagens diferentes de cimento, que conferem uma consistência seca, o qual é espalhado e compactado com equipamentos tradicionalmente empregados na pavimentação rodoviária (PCA, 1987). A técnica do CCR permite que haja redução de riscos de fissuração térmica e de reação álcali-agregado, em relação ao concreto convencional, devido principalmente ao baixo consumo de cimento (LACERDA *et al.*, 2006).

Segundo Figueira, Rivas e Soares (2015), a barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá é uma estrutura de gravidade, construída no contexto geológico de rochas ígneas, na forma de soleiras de diabásio, da Formação Serra Geral, sobre rochas sedimentares, da Bacia do Paraná. Esta região apresenta uma forte estruturação que pode ser observada localmente ou evidenciada em imagens obtidas de satélites, caracterizada por fraturas, falhas transcorrentes e normais. Estas condições conferem cuidados especiais à obra, por parte do projetista, em função de sua menor resistência mecânica, menor densidade, maior porosidade e suscetibilidade a processos de degradação quando expostas ao intemperismo ou à ação hidráulica (DUARTE *et al.*, 2010).

Batista *et al.*, (2003), afirmam que o concreto é um material heterogêneo e sua porosidade é uma das propriedades que contribui para o envelhecimento e deterioração das barragens de concreto. Para garantir estanqueidade ao longo dos anos são utilizados, concreto convencional pré-moldado e mantas poliméricas diversas (WENDLER, 2010). Apesar disso, a face de montante da barragem está em contato contínuo com a água, onde os efeitos de variação de temperatura, devido ao calor de hidratação do cimento e de movimentação higrotérmica passam a ser significativos, podendo ocasionar fissuras. Em consequência destas fissuras, da característica porosa do CCR, do fraturamento do maciço rochoso da fundação e de sua constituição litológica, admite-se a possibilidade de infiltração da água, que, gradualmente poderá provocar variações na densidade do concreto. Estas variações

podem ser equiparadas às variações do campo da gravidade da Terra causadas pelas diferenças de densidade das rochas em subsuperfície. Kearey, Books e Ian (2009), afirmam tratar-se de massa anômala que causa uma perturbação localizada no campo gravidade. Assim, nesta pesquisa procura-se entender, como é que os levantamentos gravimétricos podem detectar variações na densidade do concreto, causadas por possíveis infiltrações de água no maciço da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.

A fim de garantir melhor orientação a esta pesquisa na busca de resposta ao problema colocado, foi formulada a seguinte hipótese: Se as anomalias da gravidade resultam dos contrastes de densidade existentes entre um corpo rochoso e a sua vizinhança e, a densidade depende da composição e da porosidade do corpo rochoso e sua vizinhança, sendo as variações da porosidade a causa principal das diferenças de densidade das rochas sedimentares, então, espera-se nesta pesquisa que possíveis infiltrações de água, que penetram através dos poros do concreto compactado com rolo, bem como, através das fissuras causadas devido ao calor de hidratação do cimento e movimentação higrotérmica, possam causar variações na densidade do concreto, capazes de serem detectadas pela gravimetria.

1.1 OBJETIVO GERAL

Explorar as potencialidades da gravimetria para avaliar a variação da densidade do Concreto Compactado com Rolo da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o ganho na implantação de novas estações na crista e nos degraus a jusante da barragem da UHE de Mauá;
- Avaliar o ganho na integração de novas estações na rede gravimétrica interna a barragem, através das galerias de inspeção superior e inferior;
- Avaliar a eficácia da associação da rede gravimétrica com a rede geodésica de referência na determinação das coordenadas dos pontos de observação a montante, jusante e no interior das galerias de inspeção da Barragem;

- Avaliar a representação das anomalias da gravidade calculadas, por meio de mapas e perfis;
- Avaliar a influência do nível do reservatório no valor da gravidade;
- Realizar o levantamento de eletroresistividade (caminhamento elétrico 2D) e avaliar a ocorrência de anomalias, comparando com os resultados do levantamento gravimétrico e estimar a profundidade das anomalias;
- Avaliar a ocorrência de variação da densidade devido a prováveis infiltrações de água e saturação do Concreto Compactado com Rolo (CCR).

1.3 JUSTIFICATIVA

A barragem deve manter o reservatório em condições de segurança em relação a qualquer fissuração que possa ser induzida por cheias excepcionais, recalque ou fraturamento hidráulico de modo a garantir segurança das pessoas, do meio ambiente, dos bens e equipamentos, assim como, a continuidade de serviço.

A lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e em seu artigo 3º estabelece os objetivos da PNSB, entre os quais: “promover o monitoramento e acompanhamento das ações de segurança” na qual se insere o presente trabalho.

A aplicação dos conceitos de gravimetria no monitoramento de grandes reservatórios de água, no Brasil, foi realizada pelos pesquisadores do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) na década de 70 e 80, no reservatório da Usina de Foz do Areia e na década de 90, no reservatório da Usina Hidrelétrica de Segredo. Porém, tanto na Usina de Foz de Areia, assim como, na Usina de Segredo, não foram realizados levantamentos gravimétricos no maciço e no interior das galerias de inspeção como se apresenta neste trabalho.

O presente estudo pode fornecer uma contribuição significativa para o monitoramento de barragens, pois, é avaliada a eficiência da utilização dos levantamentos gravimétricos no mapeamento e monitoramento de variações da densidade no maciço do corpo da barragem CCR, associado ao posicionamento geodésico tridimensional. Na literatura consultada não foram encontradas

informações sobre trabalhos que abordam este assunto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

A garantia da segurança de barragens está associada ao estabelecimento de programas e atividades de monitoramento, que envolve áreas multidisciplinares, em função da complexidade das estruturas e das regiões nas quais elas são implantadas (CHAVAN e VALUNJKAR, 2015). Programa de monitoramento fornece informações necessárias para detectar precocemente os sinais de alerta e tomada de decisões por parte das equipes responsáveis pela segurança de barragens.

No âmbito do posicionamento geodésico, monitorar um ponto significa determinar e comparar as coordenadas desse ponto em épocas distintas e, verificar se dentro de certo nível de confiabilidade (significância) houve variações significativas nessas coordenadas e se estas estão ou não associadas a movimento da barragem. O monitoramento geodésico de uma estrutura envolve a realização de campanhas periódicas de observação de pontos de interesse e a utilização de métodos geodésicos tais como: triangulação e trilateração geodésica; poligonação; nivelamento geométrico; levantamentos gravimétricos; e levantamentos com sistemas de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*). É comum, associar estas diferentes técnicas, como por exemplo, o posicionamento por GNSS para a determinação das coordenadas planas dos pontos e o nivelamento geométrico de precisão para o controle altimétrico (*DEPARTMENT OF ARMY*, 1994).

O foco desta pesquisa está na utilização dos levantamentos gravimétricos aplicado ao monitoramento de estruturas, onde a transformação de coordenadas entre sistemas de referência de orientação geocêntrica para local é fundamental de modo a facilitar a interpretação de eventual ocorrência ou fenômeno.

2.1.1 Sistemas de referência terrestres

A definição do sistema de referência terrestre é feita através da adoção de um Sistema Geodésico de Referência (SGR) cuja orientação pode ser geocêntrica ou local. A implantação de um SGR obedece duas fases, nomeadamente, a definição

que inclui a escolha de constantes, parâmetros e convenções, e a materialização que é realizada por um conjunto de coordenadas de estações obtidas através de diferentes técnicas de posicionamento, criando a rede de referência (ZANETTI, 2006).

O sistema de referência GRS80 (*Geodetic Reference System* 1980) atualmente em vigor (cujos parâmetros definidores são apresentados na Tabela 1) foi adotado pela XVII Assembleia Geral IUGG realizada em dezembro de 1979. As constantes adotadas para este sistema são: raio equatorial terrestre (equivalente ao semi-eixo maior a do elipsoide de referência), o coeficiente $-C_{20}=J_2$ do desenvolvimento em harmônicos esféricos do geopotencial (potencial da gravidade da Terra), vinculado ao achatamento terrestre (f), constante gravitacional geocêntrica GM (sendo M a massa da Terra), e a velocidade de rotação da Terra (ω), (ZANETTI, 2006).

TABELA 1 - PARÂMETROS DEFINIDORES DO GRS80

Parâmetros	Abreviatura	SGR80
Semi-Eixo Maior (m)	a	6378137
Achatamento	$1/f$	298,257222101
Velocidade Angular (rad/s) $\times 10^{-11}$	ω	7292115
Constante Gravitacional Geocêntrica (m^3/s^2) $\times 10^8$	GM	0,3986004418
Esferopotencial (Gal. $\times 10^3 = 1$ u.g.p. = $10m^2/s^2$)	U_0	6263686,1
Coeficiente Harmônico do Segundo Grau	J_2	108263×10^{-8}

FONTE: MORITZ, (1984)

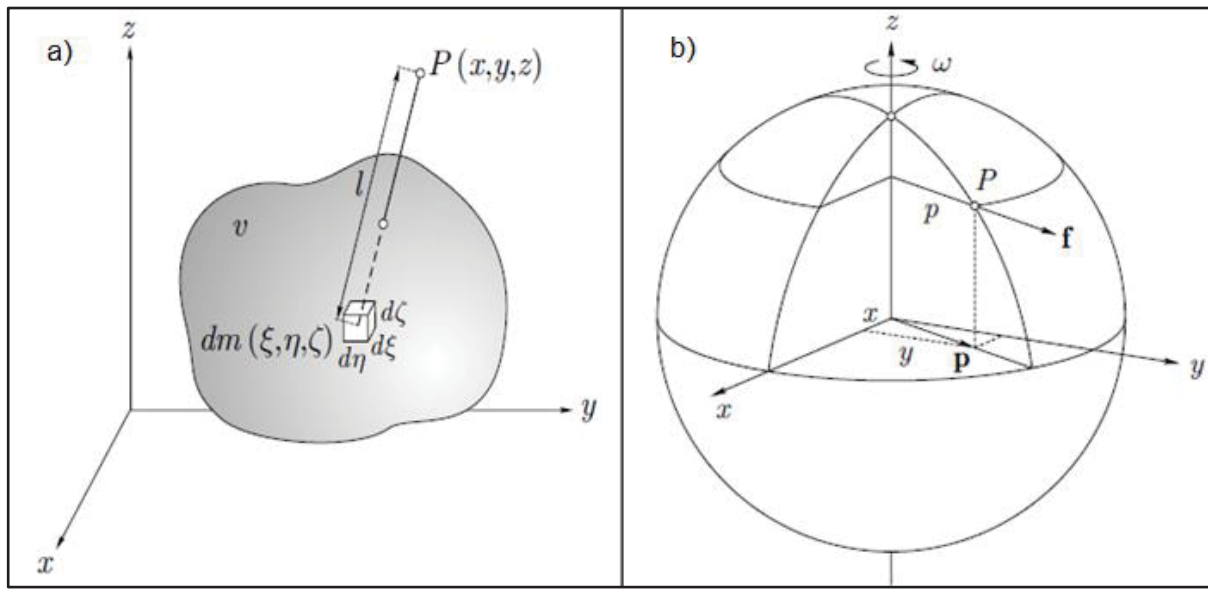
2.1.2 Gravimetria

A gravimetria envolve medidas do campo da gravidade terrestre, com o objetivo de mapear as variações de densidade e distribuição nos materiais da Terra e assim subsidiar estudos em várias áreas das Geociências, como apoio ao mapeamento estrutural e estudo de subsuperfície que baseia-se nas diferentes distribuições de densidade que provocam distorções (anomalias) no campo da gravidade normal que envolve a Terra (FRIES *et al.*, 2007).

A definição da gravidade consiste na força atuante sobre um corpo em repouso na superfície da Terra e, é resultante da força gravitacional e da força centrífuga de rotação da Terra por unidade de massa. Ela é o gradiente de W , que é

a soma do potencial da força gravitacional (V) (figura 1a) e potencial da força centrífuga (Φ) (figura 1b) (BARTHELMES, 2013; GEMAEL, 2012; HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005).

FIGURA 1 – VETOR GRAVIDADE: a) POTENCIAL DE UM CORPO SÓLIDO b) FORÇA CENTRÍFUGA



FONTE: ADAPTADO DE HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, (2005)

Pela figura 1 (a), assume-se que os pontos de massa são distribuídos de forma contínua no volume v com a densidade,

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad (1)$$

Onde dv e dm são elementos de volume e de massa respectivamente. Isso permite escrever o potencial da força gravitacional,

$$V = G \iiint_v \frac{dm}{l} = G \iiint_v \frac{\rho}{l} dv \quad (2)$$

Onde l é a distância entre o elemento de massa $dm = \rho dv$ e o ponto P atraído.

Derivando V duas vezes e fazendo algumas considerações, obtém-se,

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (3)$$

Do mesmo modo, pela figura 1 (b), a força centrífuga f numa unidade de massa é dada pela expressão:

$$f = \omega^2 p \quad (4)$$

Onde: ω é a velocidade angular de rotação da Terra e,

$$p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

é a distância ortogonal do ponto ao eixo de rotação.

Após algumas transformações matemáticas obtém-se o potencial da força centrífuga,

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2), \quad (6)$$

com a derivada,

$$\Delta \Phi = 2\omega^2 \quad (7)$$

assim, o potencial da gravidade (W) é escrito como soma do potencial da força gravitacional (V) (só atração) e do potencial da força centrífuga (Φ),

$$W = W(x, y, z) = V + \Phi = G \iiint_v \frac{\rho}{l} dv + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (8)$$

cuja derivada resulta na equação de Poisson generalizada:

$$\Delta W = \Delta V + \Delta \omega = -4\pi G\rho + 2\omega^2 \quad (9)$$

O vetor gradiente de W ,

$$\vec{g} = \text{grad } W \equiv \left[\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right] \quad (10)$$

com componentes,

$$\begin{aligned} g_x &= \frac{\partial W}{\partial x} = -G \iiint_v \frac{x - \xi}{l^3} \rho dv + \omega^2 x, \\ g_y &= \frac{\partial W}{\partial y} = -G \iiint_v \frac{y - \eta}{l^3} \rho dv + \omega^2 y \\ g_z &= \frac{\partial W}{\partial z} = -G \iiint_v \frac{z - \zeta}{l^3} \rho dv \end{aligned} \quad (11)$$

é chamado vetor gravidade; esta é a força total (soma da força gravitacional com força centrífuga) atuando em uma unidade de massa. Como um vetor, tem uma magnitude e direção, então: a magnitude g é chamada de gravidade. Esta tem a dimensão física de uma aceleração e é medida usualmente em gal ($1\text{gal} = 1\text{cm s}^{-2}$). O valor numérico de g é cerca de 978 gal no equador, e 983 gal no polo. Na Geodésia, é bastante comum usar miligal representado de forma abreviada por mGal ($1\text{ mGal} = 10^{-3}\text{ gal}$) (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005).

A direção do vetor gravidade é a direção da linha de prumo (*plumb line*), ou vertical no ponto (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005).

2.1.2.1 Medida da gravidade

Segundo Torge (1989), a magnitude do vetor gravidade é obtida através de medições absolutas ou relativas. As medições absolutas resultam no valor de g para uma estação, através de um pêndulo ou da queda livre de uma massa, enquanto as medições relativas devem ser realizadas em pelo menos duas estações, obtendo-se a diferença da gravidade Δg . Antes dos gravímetros, as medições relativas também eram realizadas através de pêndulos, que devido a sua sensibilidade exigiam um operador especializado, cujo rendimento máximo era de uma estação por dia (GEMAEL, 2012).

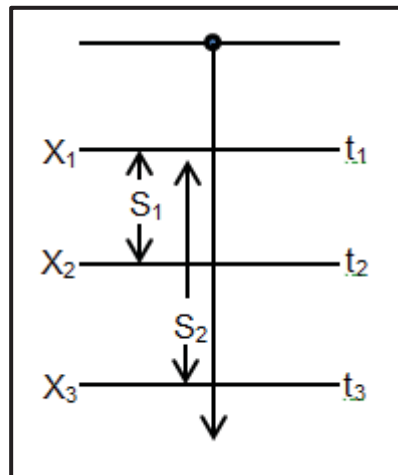
Modernamente as medições absolutas são realizadas por gravímetros absolutos (figura 2), que permitem registrar, pequenos intervalos de tempo e variações de distância ao longo da queda de uma massa (figura 3).

FIGURA 2 - GRAVÍMETROS ABSOLUTO



FONTE: ADAPTADO DE DREWES (2015)

FIGURA 3 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DA GRAVIDADE ABSOLUTA



FONTE: ADAPTADO DE DREWES (2015)

Onde:

- S_1 e S_2 correspondem aos deslocamentos;
- X_1 , X_2 e X_3 correspondem à referência dos deslocamentos S_1 e S_2 ;
- t_1 , t_2 e t_3 correspondem ao tempo dos deslocamentos S_1 e S_2

$$S_1 = v_1 \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} g (t_2 - t_1)^2 \quad (12)$$

$$S_2 = v_1 \cdot (t_3 - t_1) + \frac{1}{2} g (t_3 - t_1)^2 \quad (13)$$

$$S_2 - \frac{(t_3 - t_1)}{(t_2 - t_1)} S_1 = \frac{1}{2} g ((t_3 - t_1)^2 - (t_3 - t_1)(t_2 - t_1)) \quad (14)$$

A medição da gravidade relativa é apresentada na metodologia do presente trabalho.

2.1.2.2 Gravidade normal

O planeta Terra sofre o efeito de variação da densidade no seu interior provocando assim várias implicações, por exemplo: a irregularidade da sua superfície física, ou as deformações decorrentes da atuação de forças externas, as quais levam a admitir as coordenadas de um ponto como variáveis com o tempo. Assim, para minimizar os problemas decorrentes da irregularidade da superfície física da Terra são adotados modelos que substituem o real pelo fictício. Em problemas geodésicos, a solução pode ser encontrada no modelo denominado Terra normal (GEMAEL, 2012).

Segundo Gemael (2012), Terra normal é um elipsoide de revolução ao qual se atribui a mesma massa M (incluindo a massa da atmosfera) e a mesma velocidade de rotação da Terra real, além de considerar a sua superfície como equipotencial.

Diferente da Terra real, na Terra normal pode-se utilizar uma fórmula que permite calcular a gravidade teórica ou a gravidade normal.

A Fórmula Internacional da Gravidade, de 1980 (equação 15), deduzida do potencial normal é a base para o cálculo do valor da gravidade normal na superfície do elipsóide de referência GRS80 (MORITZ, 1984).

$$\gamma_{1980} = 978032,67715 (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) \quad mGal \quad (15)$$

Como se pode observar, esta equação é expressa como função da latitude geodésica (φ), uma das componentes das coordenadas geodésicas de cada estação. O valor da gravidade em cada estação varia também com a altitude. Estes

aspectos fazem com que haja necessidade de associar as redes gravimétrica e geodésica tridimensional para a determinação das coordenadas geodésicas das estações ocupadas durante o levantamento gravimétrico, sendo que a altitude deve ser obtida com grande rigor.

2.1.2.3 Anomalia da gravidade

A anomalia da gravidade Δg é definida como a diferença entre a gravidade real (g_P) no geoide, obtida através de observações sobre a superfície física da Terra utilizando gravímetro, por exemplo, e a gravidade normal (γ) calculada no elipsoide de referência, segundo a equação (16) (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005; GEMAEL, 2012):

$$\Delta g = g_P - \gamma \quad (16)$$

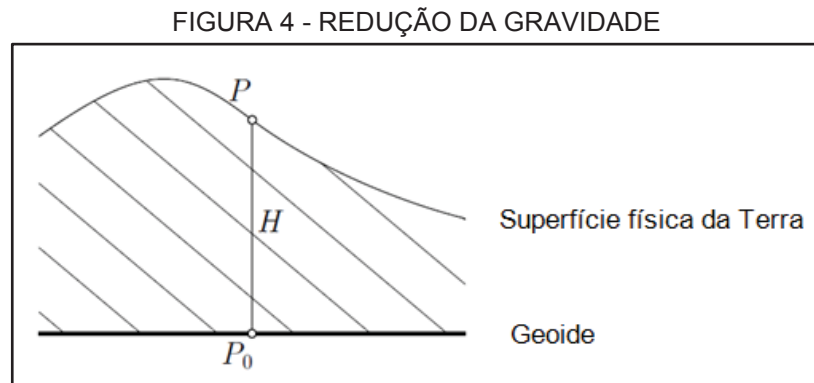
Pode-se afirmar que o maior problema relacionado à obtenção da anomalia da gravidade é a determinação do valor (g_P), tendo em vista que a gravidade é observada na superfície física da Terra. Em função disso, é necessário realizar reduções que, basicamente, consistem em pressupor um significado geofísico e simplificar os cálculos para a sua obtenção.

Segundo Gemael (2012) as anomalias da gravidade mais importantes para a Geologia e a Geodésia são as de Bouguer, ar livre e a Isostática que não se aplica a trabalhos de características locais. Em função disso, nesse estudo foi dada ênfase a anomalia Bouguer utilizada para detectar variações na densidade do concreto compactado a rolo causado pela infiltração de água.

2.1.2.4 Redução da gravidade

A redução da gravidade (figura 4) é necessária para referir (g) ao geoide, pois a gravidade (g) medida na superfície física da Terra não é a mesma com a gravidade normal (γ) referida à superfície do elipsoide. Os métodos de redução da gravidade (g) diferem de acordo com a maneira como se trabalha as massas

topográficas existentes acima do geóide (GEMAEL, 2012; LOWRIE, 2007; HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005).



FONTE: ADAPTADO DE HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, (2005)

✓ Redução ar-livre

A estação de medição da gravidade na superfície física da Terra pode estar localizada em diferentes contextos de elevação. Assumindo que não existem massas topográficas entre a estação na superfície física da Terra e a sua projeção no geóide, então se pode afirmar que a redução de altitude de um ponto sobre o valor da gravidade medida, neste mesmo ponto, chama-se redução ar-livre ($F = 0,3086H$) e é dada pela aplicação do gradiente normal da gravidade ($-0,3086 \text{ mGal/m}$).

$$g_{al} = g_P + 0,3086H \quad [\text{mGal}] \quad (17)$$

Onde H é a altitude fornecida em metros.

✓ Redução de Bouguer

A redução de Bouguer pressupõe a remoção completa das massas topográficas externas ao geóide.

Assumindo que a área em torno da estação da gravidade P é completamente plana e horizontal, como mostra a figura 5 e, assumindo também

que as massas entre o geoide e a estação têm uma densidade constante ρ . Então a atração “ A_B ” deste, designado “Platô de Bouguer” é obtida pela expressão:

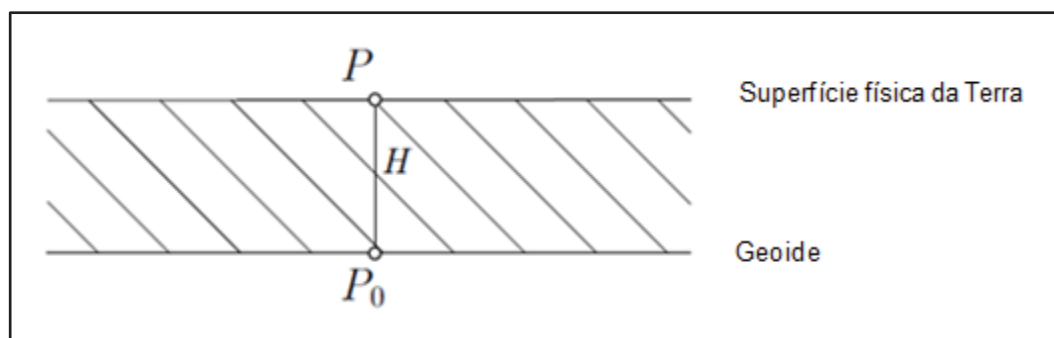
$$A_B = 2\pi G\rho H \quad (18)$$

Fazendo $\rho = 2,67 \text{ gcm}^{-3}$ (densidade média da Terra) obtém-se

$$A_B = 0,1119H \quad [\text{mGal}] \quad (19)$$

Com H em metros.

FIGURA 5 - PLATÔ DE BOUGUER



FONTE: ADAPTADO DE HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, (2005)

O processo combinado da remoção de massas topográficas e a aplicação da redução ar-livre é chamado redução simples de Bouguer. Seu resultado é gravidade de Bouguer no geoide.

$$g_B = g - A_B + F \quad (20)$$

Numericamente,

$$g_B = g - 0,1119H + 0,3086H = g + 0,1967H \quad (21)$$

✓ Correção de terreno

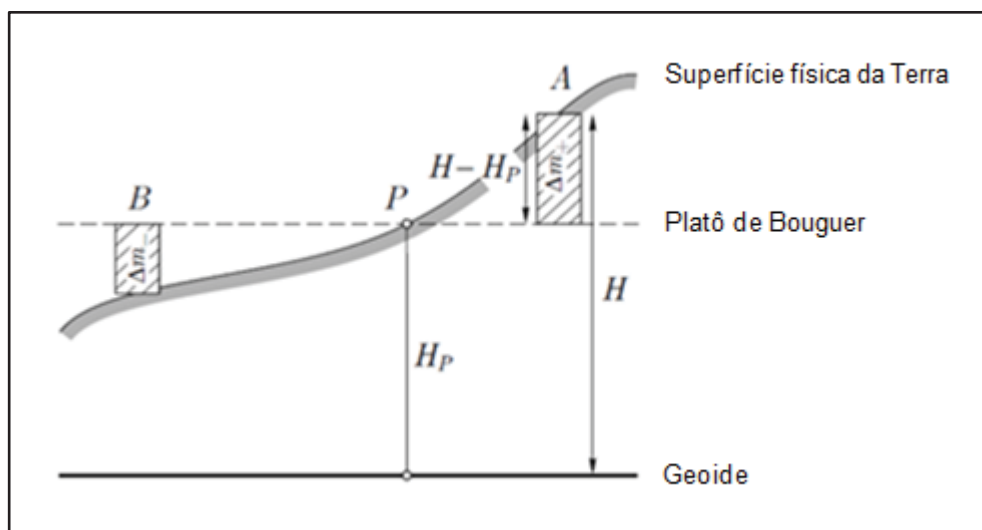
Uma redução adicional conhecida como “correção de terreno” ou “correção da topografia” deve ser aplicada, pois a redução de Bouguer não remove completamente o efeito das massas topográficas ao redor da estação de medição. Este procedimento pode ser refinado tendo em conta os desvios da topografia real em relação ao platô de Bouguer. Observando a figura 6, em (A) a massa que está em excesso (Δm_+) e que atrai para cima, é removida, causando o aumento do valor da gravidade no ponto (P). Em (B) a deficiência de massa (Δm_-) é compensada pelo acréscimo da mesma causando também, o aumento do valor da gravidade no ponto (P). Assim, a correção de terreno (C_t) é sempre positiva. Adicionando-a ao valor da gravidade de Bouguer obtém-se a gravidade completa ou refinada de Bouguer (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005).

$$g_B = g - A_B + F + C_t \quad (22)$$

Ou

$$g_B = g + 0,1967H + C_t \quad (23)$$

FIGURA 6 - CORREÇÃO DE TERRENO



FONTE: ADAPTADO DE HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, (2005)

2.1.2.5 Anomalia Bouguer

A anomalia Bouguer (Δg_B) é a resultante obtida depois da aplicação da correção de Bouguer ao valor da anomalia ar livre e é dada de forma analítica por, (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005; GEMAEL, 2012):

$$\Delta g_B = g + 0,1967H + C_t - C_B - \gamma \quad (24)$$

Onde:

- ✓ Δg_B = Anomalia Bouguer;
- ✓ g = Valor da gravidade obtido após a redução de maré e da deriva instrumental;
- ✓ H = Altitude Ortométrica em metros;
- ✓ C_t - Correção de Terreno: este termo é o de menor valor e muitas vezes negligenciável;
- ✓ C_B - correção Bouguer;
- ✓ γ (valor da gravidade normal) = determinado para cada ponto observado através da fórmula de internacional em função da latitude.

As anomalias de Bouguer são frequentemente caracterizadas por terem anomalias de vários comprimentos de onda. Algumas delas poderão ser de carácter regional, às quais podem estar sobrepostas anomalias de menor comprimento de onda, consideradas anomalias locais. O que é regional e o que é local dependem da escala do problema que se está trabalhando. Normalmente, nos levantamentos gravimétricos de detalhes, as anomalias locais são consideradas as mais importantes e, por isso, o primeiro passo na interpretação dos resultados é a remoção do campo regional de modo a isolar as anomalias residuais (KEAREY *et al.* 2009; LOWRIE 2007; NABIGHIAN *et al.* 2005; MILSOM, 2003). Em geral, para a separação das componentes regionais dos locais (residuais) são considerados vários métodos, tais como: gráficos; espectral (filtragem); e de ajuste polinomial, ou por modelagem das estruturas conhecidas, (KNÖDEL, LANGE e VOIGT, 2007).

➤ Método gráfico

O método gráfico proporciona um esboço visual do campo linear ou curvilíneo. É influenciado pelo intérprete, é lento e não pode ser automatizado (KEAREY, BROOKS e IAN, 2009). Além da intuição do intérprete, a única restrição imposta no campo regional, é a suavidade. Como resultado, haverá várias soluções para o problema da separação, ea subjetividade inerente tanto pode ser uma vantagem ou uma desvantagem, dependendo da experiência do intérprete e da capacidade de incorporar informação geológica relevante sobre o campo regional (KNÖDEL, LANGE e VOIGT, 2007).

➤ Método espectral

O método espectral proporciona meios mais quantitativos para caracterizar o alisamento de um campo regional, devido ao seu conteúdo espectral predominantemente de baixa frequência. Eles são mais rápidos e menos subjetivos do que o método gráfico, porque a separação é efetuada por filtragem do campo total, com um filtro passa-baixo. Na aplicação de métodos espectrais, campos regionais podem assumir ser produzidos por fontes largas ou profundas. No entanto, devido à sobreposição dos espectros regional e residual, uma separação completa não é possível e, dois tipos de erros, nomeadamente, distorção de sinal e transmissão de ruído, estão sempre presentes. A distorção de sinal é a eliminação de uma parte do conteúdo espectral do sinal por uma operação de filtragem. A transmissão de ruído é a remoção incompleta do ruído por um processo de filtragem (KNÖDEL, LANGE e VOIGT, 2007; FRIES *et al.*, 2007).

➤ Método de ajuste polinomial

Este método calcula a superfície matemática que dá o melhor ajuste para o campo de gravidade dentro de limites específicos. E esta superfície é considerada como sendo a anomalia gravimétrica regional. A anomalia gravimétrica residual é obtida subtraindo-se o campo regional a partir da anomalia Bouguer completa. Deste modo, a regional de ordem n é equiparada a um polinômio de grau n . Para n menor,

existe uma relativa lacuna importante entre a anomalia regional ea anomalia Bouguer completa. Com o aumento progressivo da ordem polinomial, a anomalia regional, torna-se progressivamente mais próxima à anomalia Bouguer que a cria (KOUMETIO *et al.* 2014).

Para Lowrie (2007), a tendência regional é representada por uma linha reta ou, geralmente, por uma curva polinomial suave. Se x indica a posição horizontal sobre um perfil de gravidade, a gravidade regional Δg_R pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\Delta g_R = \Delta g_0 + \Delta g_1 x + \Delta g_2 x^2 + \Delta g_3 x^3 + \dots + \Delta g_n x^n \quad (25)$$

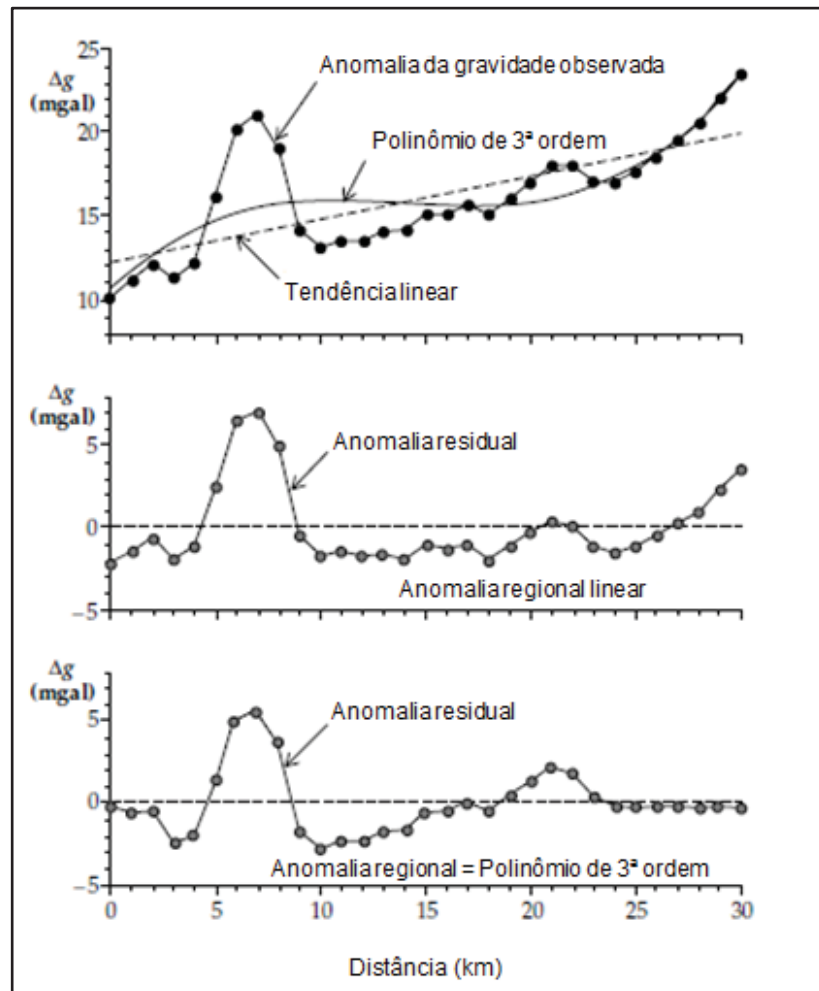
O polinômio é ajustado pelo método dos mínimos quadrados para o perfil de gravidade observada. Este fornece valores adequados para os coeficientes da gravidade (Δg_n). O método também tem inconveniente, quanto maior a ordem do polinômio, melhor ele se ajusta as observações. Uma situação extrema é quando a ordem do polinômio é um a menos do que o número de observações; a curva então passa perfeitamente através de todos os pontos observados, mas a anomalia da gravidade regional não tem significado geológico. O julgamento do intérprete é importante na escolha da ordem do polinômio, que normalmente é escolhido para ser o menor possível a fim de que represente a maior parte da tendência regional.

O ajuste polinomial pode também ser aplicado aos mapas de anomalias da gravidade. Supõe-se que a anomalia regional pode ser representada por uma superfície suave, $\Delta g(x, y)$, que é um polinômio de ordem inferior de coordenadas da posição horizontal x e y . No caso mais simples a anomalia regional, é expressa como um polinômio de primeira ordem, ou plano. Para expressar as variações no gradiente da gravidade é necessário um polinômio de ordem superior. Por exemplo, a gravidade regional, dada por um polinômio de segunda ordem é escrito:

$$\Delta g(x, y) = \Delta g_0 + \Delta g_{x1} x + \Delta g_{y1} y + \Delta g_{x2} x^2 + \Delta g_{y2} y^2 + \Delta g_{xy} xy \quad (26)$$

A figura 7 mostra a aplicação do método de ajuste polinomial em perfis de anomalias da gravidade.

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DA TENDÊNCIA REGIONAL POR UMA CURVA POLINOMIAL SUAVE CONSTRUÍDA NO PERFIL DE GRAVIDADE OBSERVADA PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS



FONTE: ADAPTADO DE LOWRIE (2007)

Após a separação de anomalias seguem as interpretações, que podem ser de forma direta ou indireta.

A interpretação direta de algumas características de uma anomalia gravimétrica permite obter, rapidamente, a informação qualitativa referente à natureza e a posição do corpo anômalo. A forma e a orientação da anomalia vistas num plano são o reflexo mais ou menos modificado da forma e orientação do corpo no subsolo que produz tal anomalia, sempre e quando este estiver a uma profundidade relativamente superficial. As anomalias produzidas por corpos profundos tendem a ter formas circulares. A magnitude das anomalias sobre os perfis gravimétricos é um dos parâmetros mais significativos para a interpretação, a

qual é proporcional ao volume do corpo e ao contraste de densidade entre este e as rochas que o rodeiam e, geralmente, inversamente proporcional à sua profundidade (CONSÓRCIO GUARANI, 2009),

A profundidade limite é definida como a máxima profundidade a que o topo do corpo pode estar e ainda assim produzir uma anomalia observável. As anomalias gravimétricas decaem com o inverso do quadrado da distância de suas fontes, por isso os corpos mais profundos produzem anomalias de menor amplitude e maior extensão que as dos corpos mais superficiais. Pode-se quantificar essa relação número de onda – amplitude com a profundidade para calcular a profundidade máxima ou limite na qual o topo do corpo anômalo poderia se situar (KEAREY, BROOKS e IAN, 2009).

Na interpretação indireta o corpo causador de uma anomalia gravimétrica é simulado por um modelo, que por causa do problema inverso, esse modelo não será uma interpretação unívoca. Porém, a ambiguidade pode ser diminuída pelo uso de outros controles sobre a natureza e forma do corpo anômalo. Lembrando que, a anomalia teórica do modelo aqui referido, pode ser calculada e a sua forma alterada até que a anomalia calculada igual aproximadamente a anomalia observada.

Uma abordagem simples da interpretação indireta é a comparação da anomalia observada com a anomalia calculada para certas formas geométricas padrão cujo tamanho, posição, forma e contraste de densidade são alterados para melhorar o ajuste. As anomalias bidimensionais podem ser comparadas com as anomalias calculadas para cilindros horizontais ou meio cilindro, e as anomalias tridimensionais, comparadas com as de esferas, cilindros verticais ou prismas retangulares retos. As combinações de tais formas podem também ser usadas para simular uma anomalia observada (KEAREY, BROOKS e IAN, 2009).

Asfahani e Tlas (2015), propuseram um método que afirmaram ser fácil e prático para interpretar anomalias da gravidade residuais, adequado a modelos geometricamente em forma simples como cilindros e esferas. Este método baseia-se na técnica de deconvolução e no algoritmo simplex para a otimização linear que estima de forma eficaz os parâmetros do modelo, como por exemplo, a profundidade a partir da superfície até ao centro de uma estrutura enterrada ou a profundidade a partir da superfície até ao topo de um objeto enterrado, e o coeficiente de amplitude a partir do perfil de anomalia de gravidade residual. Este método foi testado em

conjuntos de dados sintéticos corrompidos por diferentes níveis de ruído aleatório para demonstrar a capacidade e confiabilidade do mesmo. Os resultados obtidos mostraram que os valores dos parâmetros estimados obtidos por este método são próximos dos valores de parâmetros verdadeiros assumidos.

2.2 MÉTODO DA ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D)

Segundo Braga (2016), no método gravimétrico o campo físico a ser estudado é natural, enquanto no método geoeletrico é artificial, criado por meio de equipamentos apropriados. Os métodos geoeletricos se destacam pelo seu amplo uso em nível mundial e por comportar os métodos da eletroresistividade e polarização induzida, considerados como os mais importantes. As técnicas de investigação nos métodos geoeletricos consistem em procedimentos para estudar as variações de parâmetros físicos do meio geológico. Elas podem ser de três tipos principais: sondagens, caminhamentos e perfilagens. A diferença básica entre essas técnicas está no procedimento de campo, ou seja, na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e a maneira de desenvolvimento dos trabalhos.

2.2.1 Princípios dos métodos elétricos

A eletroresistividade foi definida a partir da Lei de Ohm, a qual estabelece uma relação da Intensidade da corrente elétrica que flui através de um condutor e a diferença de potencial (voltagem) requerido para conduzir esta corrente. Esta lei revela que a intensidade da corrente elétrica (I) em Ampère é proporcional à voltagem (V) em Volt e pode ser dada pela seguinte expressão:

$$V = R \cdot I \quad (27)$$

Onde:

R - resistência elétrica do condutor, cuja unidade é o Ohm (Ω).

No entanto, é necessário definir uma propriedade que descreva a capacidade dos materiais geológicos do subsolo em transmitir a corrente elétrica em função da distância, ou comprimento, L (m) e de uma superfície, ou área, S (m²). Desta maneira, é definida a resistividade elétrica (ρ), da seguinte forma:

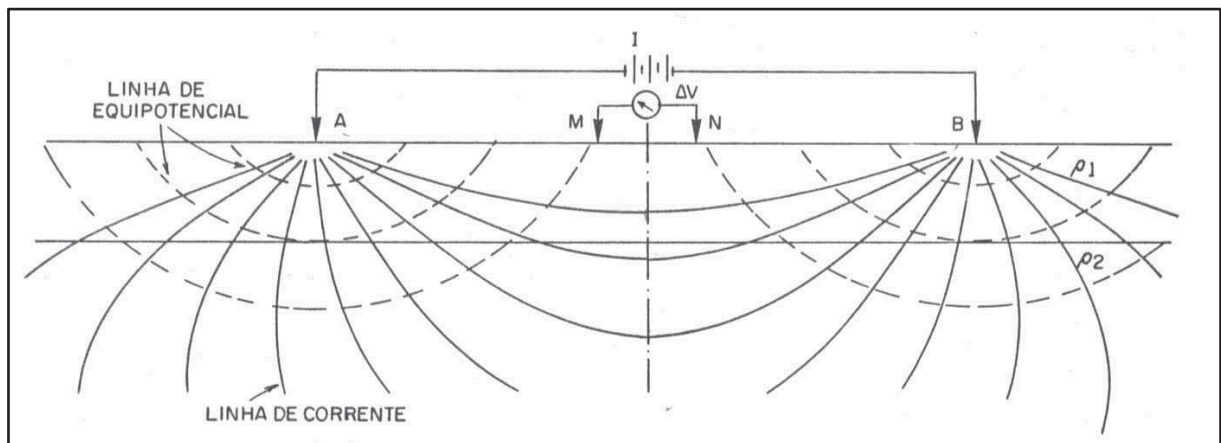
$$\rho = \frac{R.S}{L} \quad (28)$$

Onde:

ρ - é dada em Ohm.m ($\Omega.m$).

O princípio dos métodos elétricos é baseado na injeção da intensidade da corrente elétrica I no terreno, através de dois eletrodos, A e B, e na medida da diferença de potencial ΔV em volt (V), entre outros dois eletrodos M e N, fechando um circuito como indicado na Figura 8 (BRAGA, 2002).

FIGURA 8 - PRINCÍPIO DO MÉTODO ELÉTRICO INDICANDO OS ELETRODOS DE CORRENTE (AB), OS DE POTENCIAL (MN) E AS LINHAS DE CORRENTE E DE EQUIPOTENCIAL.



FONTE: BRAGA (2002)

Ao utilizar um mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio heterogêneo, a diferença de potencial (ΔV) será diferente da registrada sobre um meio homogêneo, pois o campo elétrico deverá sofrer modificações em função desta heterogeneidade. Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, o valor medido de resistividade deve refletir a heterogeneidade do semi-espaco (BRAGA, 2002).

Em função desta constatação utiliza-se o conceito de resistividade aparente (ρ_a), dado pela expressão (29), o qual não obedece mais a Lei de Ohm. Em outras palavras, a resistividade aparente (ρ_a) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espço, para o qual contribuem os valores da resistividade em cada ponto e a disposição geométrica dos eletrodos (Braga, 2002), ou seja:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (29)$$

O fator K que multiplica $\frac{\Delta V}{I}$ é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos A, B, M e N. Como existem várias formas de arranjar os eletrodos no terreno, o fator K é calculado através de expressões específicas ou pela equação geral (30):

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|}} \quad (30)$$

Devido à grande heterogeneidade do meio geológico, é natural que cada tipo litológico apresente uma resposta diferente em relação ao parâmetro físico da resistividade elétrica. De outra maneira, este parâmetro pode refletir diferentes formas de ocorrência de um mesmo material geológico, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, conteúdo mineral, e outros (BRAGA, 2002).

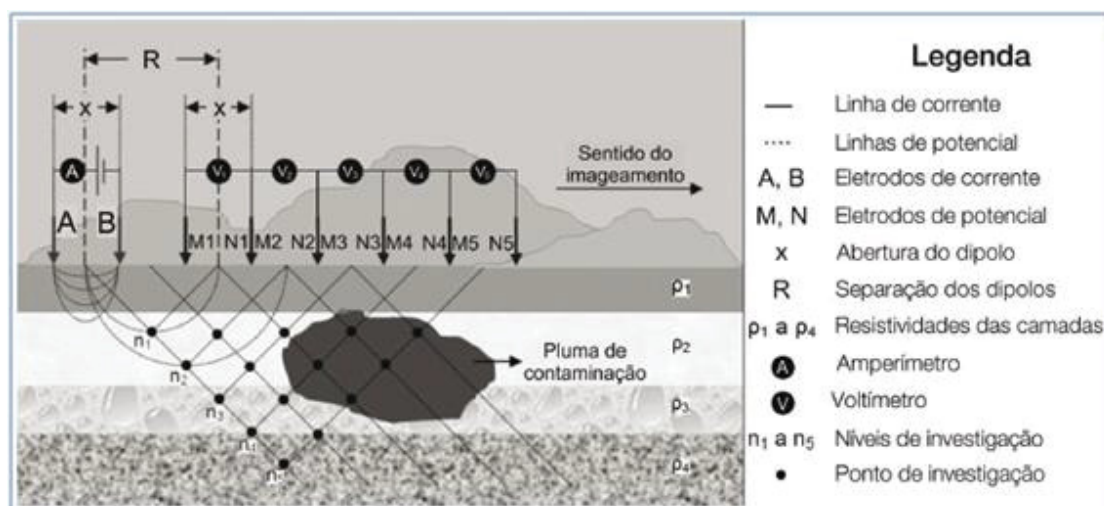
Uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como um agregado constituído de minerais sólidos, líquidos e gases, no qual sua resistividade é influenciada pelos seguintes fatores (BRAGA, 2002):

- Resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
- Resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;
- Umidade da rocha;
- Porosidade da rocha;
- Textura da rocha e a forma e distribuição de seus poros; e,
- Processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e na estrutura mineral.

Na prática, nos caminhamentos elétricos 2-D, denomina-se geralmente a fonte de corrente como circuito transmissor, ou simplesmente transmissor, e os circuitos relacionados com os eletrodos de potencial como receptor.

O arranjo dos eletrodos normalmente utilizado neste tipo de levantamento é o dipolo-dipolo, onde a separação entre os eletrodos de corrente (AB) é a mesma dos eletrodos de potencial (MN), e a distância entre seus pontos médios é um múltiplo deste espaçamento (BRAGA, 2002). A Figura 9 mostra o arranjo dipolo-dipolo aplicado em investigações ambientais.

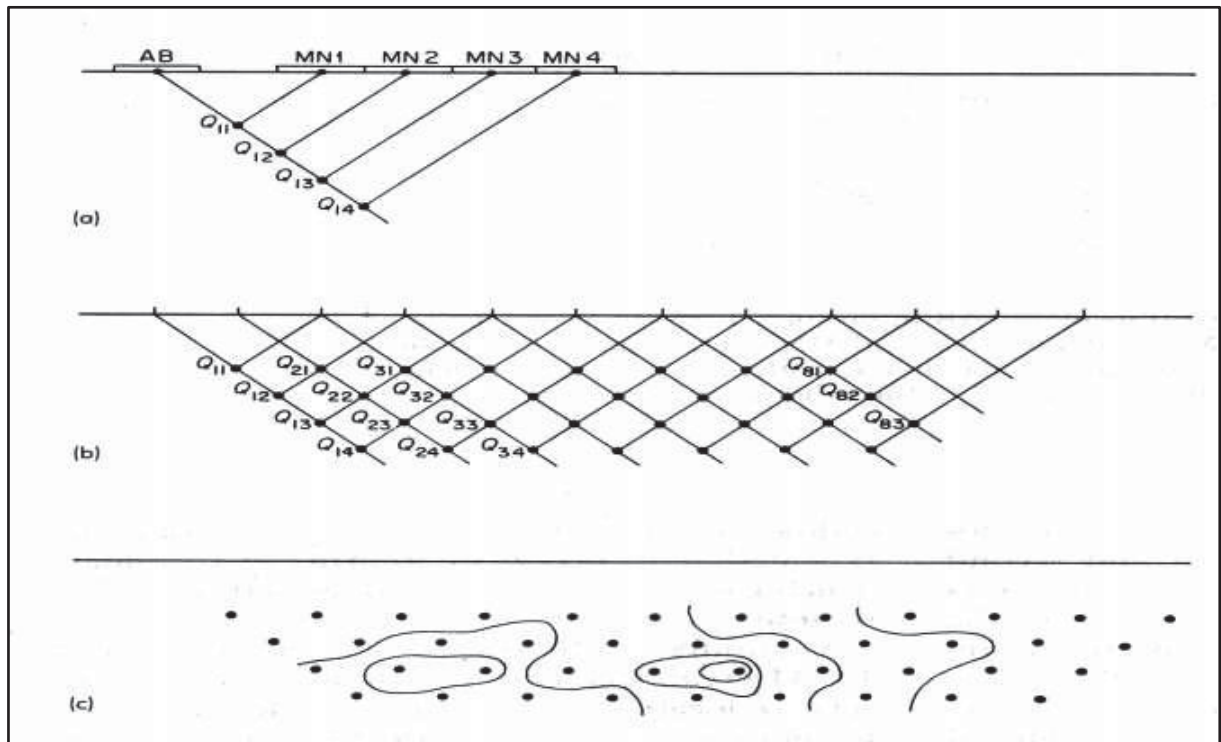
FIGURA 9 - ARRANJO DIPOLO-DIPOLO COM OS ELÉTRÓDOS DE CORRENTE (AB) E DE POTENCIAL (MN).



FONTE: BORTOLIN, (2009)

Os ensaios de caminhamento elétrico 2-D são usualmente feitos ao longo de linhas ou perfis. O procedimento mais comum é posicionar os eletrodos de corrente (AB) no início da linha. As leituras são feitas através de pares sucessivos de eletrodos de potencial (MN), igualmente espaçados. O transmissor (AB) é então deslocado para a próxima posição, na mesma linha, e o procedimento é então repetido (Figura 10 a).

FIGURA 10 - PERFIL DE AQUISIÇÃO E REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE UM ARRANJO DIPOLO-DIPOLO.



FONTE: FERREIRA, 2009

Os valores medidos pelo receptor (valores de eletroresistividade), nas diferentes posições são representados por pontos da subsuperfície, localizados nas intersecções das linhas inclinadas a 45° do centro dos dipolos (Figura 10b). Observe que os pontos assim dispostos situam-se abaixo da metade da distância entre os pontos médios do transmissor-receptor ao longo da linha do levantamento. Note também que a profundidade destes pontos aumenta na medida em que a separação transmissor-receptor também aumenta. Entretanto, não existe uma relação direta entre estes pontos e o posicionamento das fontes, embora se espere que os sinais das fontes profundas reflitam-se nas leituras onde a separação do transmissor-receptor seja maior (BRAGA, 2016).

Os dados obtidos pela configuração da Figura 10b permitem que os valores de resistividade aparente sejam interpolados por isocurvas, como mostrado na Figura 10c, gerando uma imagem da posição relativa das fontes, denominada pseudoseção. Entretanto, como referido, tais contornos não refletem o posicionamento real das fontes, mas uma aproximação de onde uma determinada

fonte pode estar situada e se a mesma é relativamente rasa ou profunda. Neste tipo de arranjo o fator geométrico K é obtido pela equação 31.

$$K = \pi a Q(Q + 1)(Q + 2) \quad (31)$$

Onde a = ao espaçamento AB=MN

2.2.2 Técnica de Inversão da Pseudoseção de Resistividade Aparente

Todas as técnicas de inversão tentam, essencialmente, encontrar um modelo cujas respostas estejam em conformidade com os dados medidos. Na técnica calcada em células, usada, por exemplo, pelo programa *Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP*, os parâmetros são os valores de resistividade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores da resistividade medida ou aparente. Sabe-se que para um mesmo conjunto de dados, há uma ampla variedade de modelos cujas resistividades calculadas se aproximam, em algum grau, dos valores medidos. Além de tentar minimizar as diferenças entre os valores calculados e medidos, a técnica da inversão também tenta reduzir outros parâmetros que produzem certas características desejadas no modelo resultante. Os refinamentos adicionais também ajudam a estabilizar o processo de inversão. O programa *Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP* usa uma técnica interativo que, partindo de um modelo inicial, busca encontrar um modelo de profundidade cuja pseudoseção seja mais próxima possível dos dados de resistividade aparente.

2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

Segundo a *Portland Cement Association* (1987), Concreto Compactado com Rolo é um material misturado, espalhado e compactado com equipamentos tradicionalmente empregados na pavimentação rodoviária, com consistência seca e trabalhabilidade tal que permita a compactação por rolos vibratórios.

Oliveira e Salles(1995), definem CCR como concreto de consistência seca (*no slump*), aspecto arenoso e com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado de forma contínua através de máquinas normalmente

aplicadas em obras de terra e enrocamento.

Marques Filho (2005) descreve CCR como uma técnica construtiva com peculiaridade de uso intensivo de equipamentos empregados tipicamente em obras de terra e enrocamento, utilizando um material conhecido (concreto), objetivando máxima velocidade de lançamento, aliado a custos baixos e teores de cimento relativamente pequenos para minimização dos efeitos de variações volumétricas de origem térmica.

Analisando o conceito de CCR apresentados acima se percebe que existem pequenas diferenças, porém, todos convergem para o aumento da produtividade na execução, buscando maiores velocidades de lançamento, reduzindo o consumo de cimento e incidência de mão de obra, ou seja, é uma técnica que representa uma evolução natural das barragens de concreto convencional, cujo projeto previa um cronograma invariavelmente extenso. A automação da técnica de CCR depende de pessoal treinado, equipamentos ajustados e materiais definidos (MARQUES FILHO, 2005). A figura 11 mostra a aplicação do CCR na construção de uma barragem.

FIGURA 11 - APLICAÇÃO DO CCR NA CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM



FONTE: COPEL, (2018)

2.3.1 Estruturas de CCR

São estruturas similares às de concreto massa onde os efeitos de variação

de temperatura devido ao calor de hidratação do cimento e de retração higrotérmica passam a ser significativos. De modo geral tais estruturas são sempre de concreto simples (sem armadura) ou eventualmente com armadura para resistir a esforços localizados. O Concreto Compactado com Rolo em grandes estruturas, como é no caso de barragens vem sendo utilizado há alguns anos, como reportam as pesquisas seguintes.

Hansen e Reinhardt (1991) afirmam que o elevado custo do concreto e o aumento da popularidade das barragens de terra e enrocamento, impulsionado pelo desenvolvimento da tecnologia de mecânica dos solos, favoreceram o declínio da construção das barragens de concreto que até 1950 representava em nível mundial uma porção igual a 38%, com a exceção da China. Entre 1951 e 1977 esta porção decresceu para 25% e agravando ainda mais entre 1978 e 1982 quando atingiu uma queda correspondente a 16,5%.

Em 1970 e 1972 foram realizadas as conferências de Las Vegas nos Estados Unidos cuja atenção esteve centrada na busca de segurança das barragens de concreto e na eficiência da construção das barragens de terra. Nestas conferências foi destacado o trabalho *The Optimum Gravity Dam*, de Raphael, J. M., em 1970 que aborda a aplicação de equipamentos de construção de maciços de terra e de rocha para construção de maciços de concreto impulsionando assim o desenvolvimento da metodologia do Concreto Compactado com Rolo (MILANI FILHO, 2003).

Entre 1958 e 1964 com a construção da barragem de Alpe Gera na Itália foi dado um importante ponto de partida para o desenvolvimento de novos métodos de construção de barragens de concreto. Em lugar dos tradicionais blocos de concreto verticais o concreto foi lançado em várias camadas horizontais com cerca de 0,70 m de altura. Deste modo, a barragem de concreto foi executada com tecnologias de construção de barragens de terra. O adensamento do concreto foi realizado com vibrador de imersão. Tal fato impediu que a barragem de Alpe Gera se tornasse a primeira a ser executada em Concreto Compactado com Rolo. Um método construtivo similar foi usado na mesma época, na barragem de Quaira Della Miniera, também na Itália (GENTILE, 1964).

John Lowe publicou em 1981 um artigo sobre a aplicação de Concreto Compactado com Rolo em uma ensecadeira com 65 m de altura em Formosa, em 1962, na barragem de Shihmen. Essa técnica recebeu a denominação de *rollcrete*,

abreviação de *roller compacted concrete* (MILANI FILHO, 2003).

Em 1974, com o objetivo de reduzir os custos e os prazos executivos de barragens de concreto, o Ministério das construções do Japão por intermédio do *Committee on Rationalized Construction of Concrete Dams* realizou um programa de pesquisas que procurou manter a qualidade e o aspecto das barragens de concreto a gravidade. O estudo preliminar relatou que a metodologia adotada na barragem de Alpe Gera combinada com o processo de compactação com rolo vibratório seria a linha mais conveniente a ser seguida. Uma avaliação da metodologia descrita foi observada em 1976 numa ensecadeira de montante da barragem de Ohkawa. Nesta, utilizou-se concreto convencional adensado por vibradores de imersão nas faces dos paramentos da barragem e o núcleo foi executado simultaneamente com Concreto Compactado com Rolo. Após essa aplicação foram realizadas diversas outras execuções de aterros experimentais e ensaios de laboratórios (ANDRIOLO, 1989).

Entre os anos 1974 e 1982, algo em torno de 2.700.000 m³ de Concreto Compactado com Rolo foram aplicados na barragem de Tarbela no Paquistão. A aplicação desse concreto ocorreu no fechamento do túnel, em substituição à rocha e maciço que sofreu colapso quando se enchia o reservatório. Durante os reparos ocorridos foram lançados em torno de 350.000 m³ de CCR compactados em 42 dias de trabalho. Um fato importante ocorreu durante as cheias de 1980, onde parte do CCR desprotegido e próximo ao vertedouro de serviço foi submetida a elevadas vazões, não tendo sido verificado nenhuma erosão de ordem significativa. Tal acontecimento serviu para confirmar a confiabilidade à erosão do CCR quando submetido ao fluxo de água (HANSEN e REINHARDT 1991).

Em 1982 foi notificada a conclusão da barragem de Willow Creek (Figura 12), em menos de cinco meses, com 52 m de altura, localizada nos Estados Unidos da América. Foi a primeira grande barragem no mundo totalmente construída em Concreto Compactado com Rolo, com volume de CCR em torno de 329.000 m³ (ANDRIOLO, 1989).

FIGURA 12 - BARRAGEM DE WILLOW CREEK NOS EUA



FONTE: TOURIST (2018)

De acordo com Kuperman (1996) a primeira aplicação de Concreto Compactado com Rolo em barragens no Brasil ocorreu em 1978 na Itaipu Binacional. Na ocasião foi aplicado na rampa de acesso às fundações, na estrutura de desvio, um volume total de 26.000 m³ com pico de concretagem de 3.054 m³/dia. No mesmo ano, o Concreto Compactado com Rolo foi aplicado na barragem de São Simão, onde foram lançados cerca de 40.000 m³ em camadas de 50 cm de altura, no preenchimento das galerias de desvio. Em 1982, foi relatado o primeiro lançamento de CCR em estrutura permanente. A aplicação ocorreu no muro direito da eclusa de navegação de Tucuruí com um volume de cerca de 12.000 m³ executados em camadas de 25 cm de altura. Outra aplicação do CCR que se tem notícia foi na Usina Hidrelétrica de Três Marias foram utilizados aproximadamente 14.600 m³ de CCR na modificação do perfil do vertedouro.

Um marco importante na aplicação do Concreto Compactado com Rolo no Brasil ocorreu em 1986 quando a barragem de Saco de Nova Olinda, localizada na Paraíba, com 56 m de altura e volume de CCR de 138.000 m³ foi construída em pouco mais de três meses obtendo pico de concretagem de 2.500 m³/dia. Os resultados e detalhes desta obra receberam destaques tanto no país como no exterior, especialmente pelo custo do CCR em torno de US\$ 40/m³. Foi a primeira

barragem brasileira totalmente construída em Concreto Compactado com Rolo e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo (ANDRIOLO, 1989).

No Estado do Paraná, na década de 90, iniciou-se a construção das duas primeiras barragens de grande porte em CCR. Derivação do Rio Jordão, da COPEL em 1996, com 547.000 m³ de CCR e 95 m de altura (Figura 13). Apesar de ter sido projetada em solução de concreto a gravidade possui eixo longitudinal curvado por motivos hidráulicos (MARQUES FILHO *et al.* 1996).

FIGURA 13 - BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO



FONTE: OLIVEIRA, MUSSI e MOSER,(2005)

A outra construção foi a Usina Governo José Richa (figura 14), também da COPEL construída em 1998, com 66 m de altura e volume de CCR igual a 912.000 m³ (MARQUES FILHO, 2005).

FIGURA 14 - VISTA GERAL DA UHE DE SALTO CAXIAS



FONTE: GRANEMANN (2005)

A barragem mais recente construída na base CCR no Estado do Paraná é a da Usina Hidrelétrica de Mauá (figura 15). Teve início nos finais da década 2000 – 2010 e conclusão em 2012. É uma usina de médio porte, com potência instalada de 361 MW, sendo 350 MW na casa de força principal e 11 MW na secundária ou Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

FIGURA 15 - VISTA GERAL DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ



2.3.2 Principais propriedades do CCR

Segundo MILANI FILHO (2003), o Concreto Compactado com Rolo tem características aproximadamente iguais às do concreto convencional. Os valores obtidos para diversas propriedades têm mostrado grande semelhança entre os dois tipos de concreto. Algumas diferenças são geradas em sua maior parte na dosagem ou processo de adensamento, pois o CCR possui menor teor de água e de pasta que o concreto convencional.

A massa específica obtida para o CCR é ligeiramente superior, cerca de 1 a 3% à do concreto convencional com os mesmos tipos de agregados. Isto ocorre devido ao menor teor de água e de pasta da mistura e da maior energia da compactação. Entretanto, caso sejam utilizados finos de menor massa específica como “filler” ou o teor pasta seja aumentado com adições de água ou de materiais pozolânicos, o aumento da massa específica pode não ocorrer.

Em obras executadas no Brasil foram obtidas massa específica de CCRaproximadamente igual a 2,4 g/cm³ em Tucuruí e Saco de Nova Olinda e 2,6 g/cm³ em Itaipú. O quadro 1 mostra os valores de massa específica de diferentes obras em CCR.

QUADRO 1 - MASSA ESPECÍFICA MÉDIA DO CCR EM DIVERSAS OBRAS

OBRA	PAÍS	MASSA ESPECÍFICA(g/cm ³)
Itaipu	Brasil	2,617
Saco de Nova Olinda	Brasil	2,361
Shimajigawa	Japão	2,460
Ohkawa	Japão	2,303
Sakaigawa	Japão	2,543
Upper Still water	EUA	2,400
Santa Efigênia	Espanha	2,370

FONTE: ANDRIOLO (1989)

2.3.3 Vantagens do uso do CCR em barragens

Segundo LACERDA *et al.* (2006), o CCR apresenta as seguintes vantagens em relação a outros concretos em obras de barragens:

- Produtividade superior a outros processos;
- Redução do custo (cronograma reduzido);
- Mão de obra otimizada e de fácil aplicação;
- Aproveitamento de novos materiais;
- Maior fluência (menor probabilidade de fissuras térmicas);
- Credibilidade no meio técnico;
- Modernização dos processos executivos;
- Menor interferência das condições climáticas no lançamento.

A redução no custo pode ser atribuída ao uso de equipamentos de grande produção, redução do consumo de materiais de custo elevado, redução sensível no uso de formas, redução e simplificação na infraestrutura de apoio (RESENDE, 2005). A técnica do CCR também diminui o risco de ocorrência de fissuras térmicas e de reações deletérias principalmente em função do baixo consumo de cimento.

2.3.4 Ocorrência de danos em barragens de concreto

Os principais danos que podem ocorrer numa barragem de concreto se localizam no próprio concreto, no maciço rochoso da fundação, nas armaduras e originam-se materiais defeituosos, inferiores, inadequados ou deteriorados. Os danos em concreto podem ser devidos a: lixiviação; subpressões elevadas; erosão por abrasão; erosão por cavitação; reação álcali-agregado; designado por RAA; perda de resistência; e recalques.

A RAA é causada pela reação dos álcalis do cimento com os minerais reativos de algumas rochas utilizadas como agregado, que causam a lenta expansão do concreto ao longo do tempo. Admite-se como aceitável, uma abertura de fissuras 0,3 mm para as estruturas em geral e 0,2 mm para as zonas em contato com a água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2015).

As anomalias nas armaduras podem ser devidas a: eletrólise; corrosão; fadiga; corte; e ruptura. Enquanto que no maciço rochoso podem ser devidas a desintegração, ao amolecimento e a dissolução da rocha ou movimentação nas descontinuidades (ICOLD, 1979).

3 ESTADO DA ARTE

As variações do campo da gravidade da Terra refletidas pelo transporte de massa na profundidade permitem a caracterização dos processos subsuperficiais (SOFYAN *et al.*, 2015). A utilização de técnicas de monitoramento gravimétrico tem sido aplicada para diversas investigações. Atualmente, a aplicação da gravimetria híbrida que combina a utilização de gravímetros absolutos e relativos tem sido um sucesso na investigação de processos dinâmicos em vários campos geotérmicos e vulcânicos. Segundo HINDERER *et al.*, (2015); SOFYAN *et al.*, (2015) e NISHIJIMA *et al.*, (2010), esta técnica se apresenta com algumas vantagens, nomeadamente, capacidade de reduzir as incertezas causadas por variações de gravidade regionais e reduzir o fator de correção de deriva.

Kasch *et al.* (2013), afirmam que Observatórios Geodinâmicos ao redor do globo monitoram continuamente sinais como a gravidade, inclinação e deformações em função do tempo. No entanto, sinais globais são muitas vezes mascarados por efeitos locais causados pelas imediações da estação, incluindo a configuração geológica local. Esta interligação está bem estabelecida para gravímetros supercondutores que observam as variações do campo da gravidade em alta resolução. A combinação do mapeamento e modelagem geológica e gravimétrica em torno do Observatório Geodinâmico Moxa na Alemanha resulta numa correção significativa de dados de gravidade originais e fornece uma interpretação mais realista da área de estudo. Os autores referem que esta é uma ferramenta nova e poderosa na investigação da gravidade por gravímetros supercondutores e proporciona uma redução muito bem sucedida em efeitos hidrológicos locais na série temporal.

Braitenberg *et al.*, (2016) utilizaram a gravimetria para detectar a presença de grutas subterrânea e estudar a sua extensão numa região cárstica. Segundo estes autores, grutas subterrâneas constituem um perigo quando construções artificiais são erguidas na sua superfície, devido a possível dolina ou colapso. Nesse contexto, “o estudo na região cárstica possui um grande impacto ambiental”, uma vez que permite o planeamento de desenvolvimento urbano a uma distância segura de grutas subterrâneas. O mapeamento das grutas subterrâneas existentes pode também ser útil para o uso civil geral, tais como, depósitos naturais, práticas de turismo e desportivas.

Kersten *et al.*(2017) afirmam que o projeto de pesquisa SIMULTAN aplica uma combinação avançada de técnicas geofísicas, geodésicas e de modelagem para obter uma melhor compreensão da evolução e características das grutas. As grutas são inerentemente relacionadas à deformação superficial e, portanto, possuem grande relevância social, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. O projeto SIMULTAN investiga uma abordagem integrada para monitorar as grutas relacionadas ao afundamento de massa e as deformações superficiais induzidas por carbonatos.

Conjuntos de dados de pontos idênticos e adjacentes são usados para uma combinação consistente de técnicas geodésicas e geofísicas. As redes de monitoramento foram estabelecidas em Hamburg e Bad Frankenhausen (Thuringia). Pesquisas de nivelamento indicaram taxas de subsidência de cerca de 4-5 mm por ano nas principais áreas de subsidência de Bad Frankenhausen com um máximo local de 10 mm por ano em torno da torre de uma igreja. Estes autores afirmam também que a combinação de técnicas geodésicas e gravimétricas para monitorar e caracterizar processos geológicos no interior e abaixo da superfície da Terra é exemplarmente discutido para a área de estudo Bad Frankenhausen e proporcionam resultados geralmente concordantes.

Programas de monitoramento têm sido aplicados também para acompanhar variações no comportamento de diversos reservatórios. No campo de carbonato de baixa permeabilidade em Oman foi aplicado um programa de monitoramento gravimétrico para um reservatório devido a variações significativas da sua densidade, causadas pela injeção de vapor para melhorar a drenagem de óleo e gás por gravidade (GLEGOLA *et al.*, 2015).

Segundo Kabirzadeh, Kim e Sideris (2016), o efeito da gravidade na superfície devido à injeção do CO₂ em reservatórios geológicos sempre foi modelado como uma anomalia negativa desprezando o sinal da gravidade causado pelo efeito de variações da porosidade. Esta teoria é geralmente válida em reservatórios normais onde o CO₂ injetado substitui o fluido ambiente sem causar pressão excessiva, resultando em uma anomalia de densidade subterrânea negativa e um sinal de gravidade negativo na superfície do solo, juntamente com uma deformação insignificante do reservatório. Estes autores desenvolveram pesquisas que apoiam uma hipótese alternativa em reservatórios comprimidos, onde há geração de

aumento de pressão e consequente alteração volumétrica devido à injeção do CO₂. O CO₂ injetado em reservatórios comprimidos enche a porosidade extra e a massa de CO₂ é adicionada ao fluido ambiente sem substituição. Os sinais gravimétricos e geodésicos do CO₂ injetado nos reservatórios comprimidos são caracterizados por um sinal de gravidade positivo como resultado apenas de variações do balanço de massa de CO₂, um sinal de deformação da superfície do solo ascendente e um sinal de gravidade negativa originado pelo gradiente de ar livre, efeito da deformação da superfície do solo.

Fukuda (2011) afirmou que dados de medições de gravidade precisas no terreno associado aos dados de gravidade obtidos por satélite GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) foram aplicados para monitorar as variações de águas subterrâneas. Este esquema combina medições de gravidade relativa e absoluta, bem como medições de GPS e, monitora também a subsidência do solo associado às variações de águas subterrâneas. Na referida pesquisa foi utilizado um gravímetro absoluto tipo portátil (Micro-G Lacoste Inc. A10) que depois de realizado vários testes em campo mostrou ser capaz de alcançar uma acurácia de 10 µGal (100 nm/s²), ou melhor. Dados do GRACE são suficientemente precisos para identificar variações de gravidade devido às variações de águas subterrâneas. O estudo realizado na península Indochina mostrou bons resultados (detectou alteração de massa e variações de gravidade devido à seca de 2006, na Austrália) de tal forma que o autor sugere a aplicação de dados do GRACE para monitorar variações seculares de águas subterrâneas na escala continental.

Para Jin e Feng (2014), a água subterrânea é um dos parâmetros-chave na gestão dos recursos hídricos e do ciclo hidrológico. No entanto, monitorar a água subterrânea global através de instrumentos tradicionais é uma tarefa bastante difícil. Este fato tem sido superado pela recente missão GRACE que proporcionou uma oportunidade para medir o armazenamento global de água e suas variações. No âmbito regional as variações de água subterrânea têm sido bem estimadas e investigadas a partir da missão GRACE. Porém, variações globais de água subterrânea ainda não são claras. As variações anuais significativas de água subterrânea mundial são encontradas com a amplitude média de 28,98 mm, enquanto a amplitude semi-anual é quase metade da amplitude anual em muitas partes do mundo, com a média de 11,06 mm. A tendência média das variações de

água subterrânea global é $1,86 \text{ mm} \pm 0,36 \text{ mm} / \text{ano}$. A tendência reflete, principalmente, os recentes eventos extremos, como por exemplo, esgotamento de água subterrânea no noroeste da Índia, Califórnia e Norte da China, secas em La Plata e Sudeste EUA, e inundações na Amazônia.

A fusão de modelos que utilizam dados de observações de satélite, gravimetria aérea e terrestre na modelagem do campo da gravidade, lida frequentemente com conjunto de dados derivados da gravimetria terrestre que possuem erros sistemáticos de longo comprimento de onda e cobertura de dados não homogêneos e, que, não são comuns para o conjunto de dados provenientes da gravimetria aérea e por satélite. Com o objetivo de ajudar na definição de prioridades de coleta de dados e melhorar o planejamento global das pesquisas de gravidade, Bolkas, Fotopoulos e Braun(2016) estudaram o impacto dos dados da gravidade aérea para a fusão de modelos de campo da gravidade. Neste estudo os autores concluíram que os referidos dados são importantes para identificar regiões problemáticas, pois, fornecem informações valiosas em comprimentos de onda médios e curtos.

Hirt *et al.* (2016), apresentaram um novo modelo de Gravidade Global (GGM) de grau 2190 que pela primeira vez melhora a resolução do campo de gravidade sobre a totalidade da Antártida Continental para aproximadamente 10 km na escala espacial. A criação desse modelo chamado SATGravRET2014 que é a combinação da gravimetria por satélite (GRACE e GOCE – Gravityfieldandsteady-stateOceanCirculation Explorer) com sinais gravitacionais derivados do Bedmap2 deveu-se as dificuldades apresentadas pelos modelos globais do geopotencial de alto grau, nomeadamente, EGM 2008 e EIGEN-6C4. Estes modelos determinam o campo de gravidade de estruturas até uma escala espacial de aproximadamente 10 km sobre a maior parte da superfície da Terra, porém, com uma exceção notável na Antártica Continental, onde a informação da gravidade nesses e outros modelos é baseado somente nas observações de gravimetria por satélite e limitado a uma escala espacial de cerca de 80 a 120 km.

A gravimetria absoluta e relativa permite a determinação da gravidade para posições específicas, bem como, a detecção de variações de gravidade de um dado lugar com o tempo. A posição geométrica de um ponto (uma estação) de gravidade tem de ser definido com precisão, por exemplo, em projetos de investigação

geodinâmicos, a uma altura ao longo da vertical acima de uma estação na superfície da Terra. Redes geodésicas com extensão local, regional ou global podem ser pesquisadas para monitorar as variações de gravidade de curto ou longo prazo (TIMMEN, 2010).

Barlik, Olszak e Pachuta, (2004), num estudo sobre o monitoramento gravimétrico de pontos de uma rede geodinâmica no Sudety, atribuíram a variação da gravidade aos cortes florestais, desumidificação da Terra e às condições meteorológicas da região.

Segundo Dogan *et al.* (2013), entre 2009 e 2011 foi realizado um monitoramento gravimétrico em Izmit na região de Mármara após o terremoto de 17 de Agosto de 1999. Foram realizadas medições repetidas de gravidade absoluta em seis estações utilizando um gravímetro absoluto A10. Foi estabelecida uma linha de base de calibração gravimétrica (da gama de cerca de 415 mGal; sabendo que $1\text{mGal}=10^{-5} \text{ m/s}^2$) na região para fins de calibração de gravímetros relativos. Para estes autores, as medições de gravidade absoluta, repetidas duas vezes por ano (Junho e Outubro) podem determinar variações de gravidade com uma precisão melhor do que 5 microGal/intervalo ano.

As estações de gravidade absoluta indicaram um decréscimo na gravidade, estatisticamente significativa em uma das estações na linha de calibração, mas em outras não. Geralmente a diferença de gravidade absoluta está de acordo com a tendência geral de variações de gravidade relativas. Além disso, gradientes de gravidade verticais precisas, com medições relativas foram determinados nas estações de gravidade absoluta para a redução da gravidade medida ao marco de referência. Os gradientes dispersam em torno da constante nominal ($3,086 \mu\text{Gal/cm}$) entre $2,82 - 3,73 \mu\text{Gal/cm}$, como um resultado das anomalias de densidade local. A diferença a partir do gradiente nominal causa erro em torno de $7 - 14 \mu\text{Gal}$ mediante a aplicação do gradiente vertical normal em vez de um valor medido diretamente.

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados vários materiais e equipamentos, nomeadamente, receptor GNSS de marca *Hiper* da *Topcon* com precisão horizontal nominal de $10\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$ e precisão vertical nominal de $20\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$, para obtenção das coordenadas geodésicas; softwares “*Oasis montaj versão 8.5*” da *Geosoft* para o processamento dos dados, entre outros disponíveis no Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia e demais laboratórios do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Contudo, se realça a utilização do sistema *Autograv CG-5* da *Scintrex* ou simplesmente “gravímetro relativo Scintrex CG5 nº 40986” que é descrito a seguir.

O gravímetro CG-5 da Scintrex (figura 16) é um medidor de gravidade e reflete as variações da densidade em subsuperfície. É automatizado e utiliza um microprocessador com uma faixa de medição de mais de 8000 mGal sem reiniciar, resolução de leitura de 0,001 mGal e precisão de 0,5 μGal . Isso permite que o gravímetro seja usado para pesquisas de campo detalhadas e levantamentos regionais ou geodésicos em grande escala.

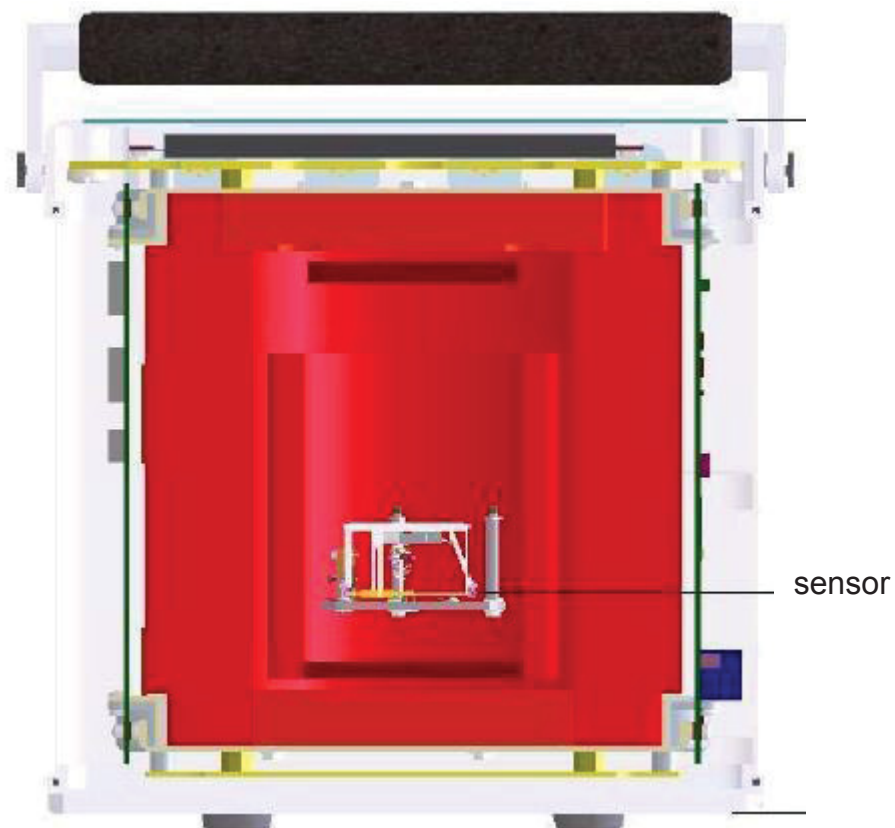
FIGURA 16 - ESQUERDA: GRAVÍMETRO SCINTREX CG-5 SOBRE O TRIPÉ. DIREITA: DETALHES DO TRIPÉ.



FONTE: TORRES, (2013)

O elemento sensor do CG5 (figura 17) consiste em um sistema de mola elástica de quartzo que é suportado por uma massa que se move entre as placas de um capacitor modificando sua capacitância. Em cada lugar, a posição da massa depende do seu peso e, portanto, do vetor força da gravidade. Fundamentado nisso a leitura do gravímetro é a tensão que deve ser aplicada ao sistema para levar a massa a uma posição fixa ou de equilíbrio, um sinal digitalizado, processado e armazenado. Devido à constante de recuperação de qualquer sistema elástico, a posição de equilíbrio da mola varia com o tempo, a este fenômeno denomina-se deriva estática. Para corrigir tal efeito e as variações de nivelamento e temperatura, bem como transformá-lo em unidades de gravidade utiliza-se uma constante de calibração. O valor final da observação, para cada estação, consiste na realização de 6 leituras de gravidade por segundo durante o tempo indicado (ciclo), fornecendo ao final do ciclo um valor médio e seu desvio padrão (SCINTREX, 2006).

FIGURA 17 - VISTA GERAL DA LOCALIZAÇÃO DO SENSOR DO GRAVÍMETRO CG-5



FONTE: SCINTREX, (2006)

O gravímetro CG-5 é operado através de um sistema de “menu” na sua face frontal (figura 18), que permite verificar e ajustar os parâmetros internos (deriva estática, sensibilidade e *offset* de sensores de nivelamento), selecionar as opções de operação, nivelar adequadamente o instrumento antes de fazer medições, definir parâmetros de leitura (número de ciclos e duração), iniciar e parar o processo de leitura e baixar os arquivos de dados.

FIGURA 18 - IMAGEM DA TELA FRONTAL DO GRAVÍMETRO CG-5



FONTE: TORRES, (2013)

Para evidenciar as características deste equipamento, o quadro 2 apresenta algumas especificações técnicas.

QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO GRAVÍMETRO CG-5 DA SCINTREX

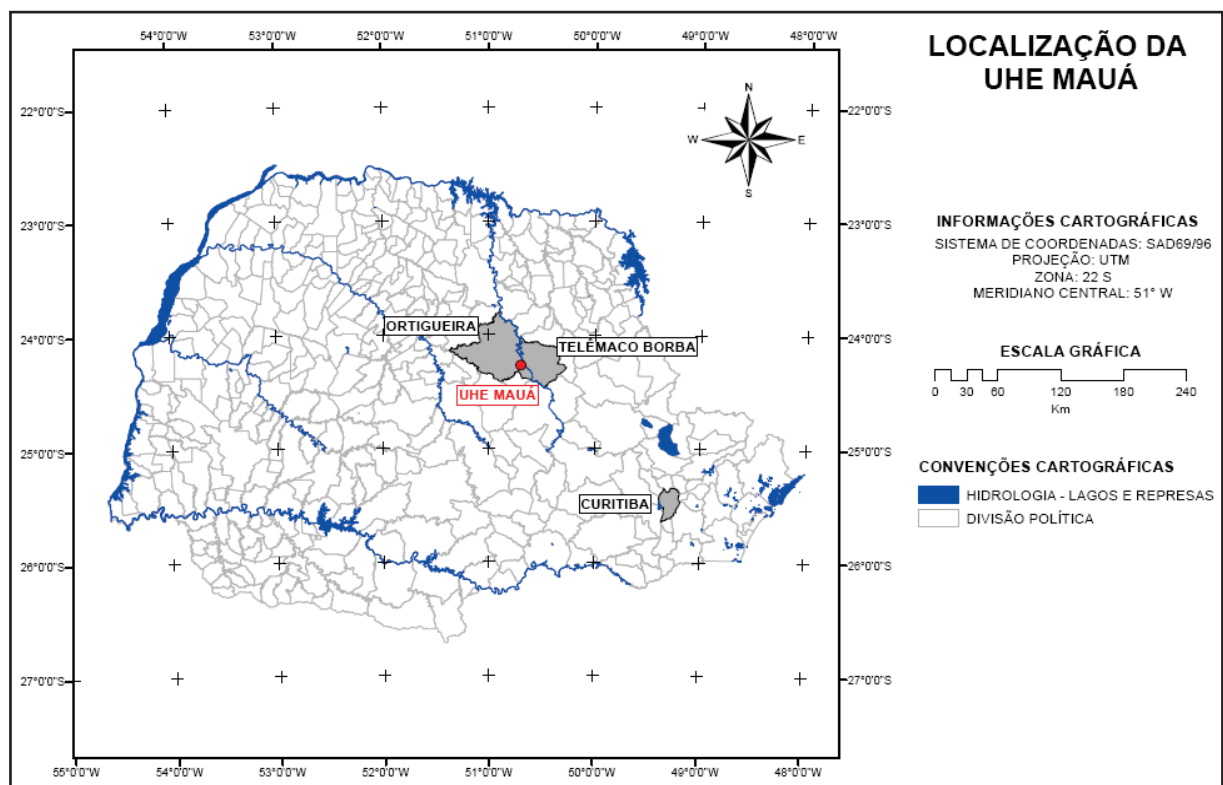
Resolução	0,001 mGal ou 1 μ Gal
Faixa mínima de operação	8000 mGal
Deriva estática residual	Menos de 0,02 mGal/dia
Repetibilidade	0,005 mGal ou melhor
Faixa de correção automática de nivelamento	+/- 200 segundos de arco (efetivo até + ou -40)
Rejeição de ruído	Amostras com um desvio superior a 4 vezes o desvio padrão médio (6 vezes quando operando com a opção de filtro de sismicidade, selecionada na inicialização do instrumento)
Correções automáticas dos dados	Maré, inclinação (nivelamento), temperatura, rejeição de ruído, filtro de sismicidade. Próxima correção topográfica (por meio da introdução de dados topográficos).
Dados registrados e mostrados na tela	Gravidade corrigida
	Desvio padrão
	Inclinação de nível X
	Inclinação de nível Y
	Variação da temperatura do sensor
	Correção luni-solar (maré) por Longman
	Duração da medição
	Correção de terreno
	Tempo de início de medição e cabeçalho com informações (incluindo data, constantes de inicialização e parâmetros de aquisição)
Temperatura de operação	Padrão -20° C a +45° C
	Opcional -40° C a +45°C
Memória	Tecnologia flash
	Padrão de 12 Mbytes com aproximadamente 200000 leituras. Os dados brutos de cada amostra são gravados (6 por segundo) e a capacidade depende do tempo de leitura selecionado
Peso e dimensões	336 x 190 x 177mm sem conectores
	Peso 8,9 kg
	Bateria 336 x 215 x 86mm, 6,4 kg

FONTE: TORRES, (2013)

4.2 LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ

A barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá localiza-se no rio Tibagi, entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (figura 19). É o primeiro aproveitamento de médio porte a ser implantado no contexto geológico de rochas sedimentares do Segundo Planalto Paranaense, onde também ocorrem, disseminadas no maciço, intrusões de rochas ígneas na forma de soleiras e diques de diabásio.

FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ

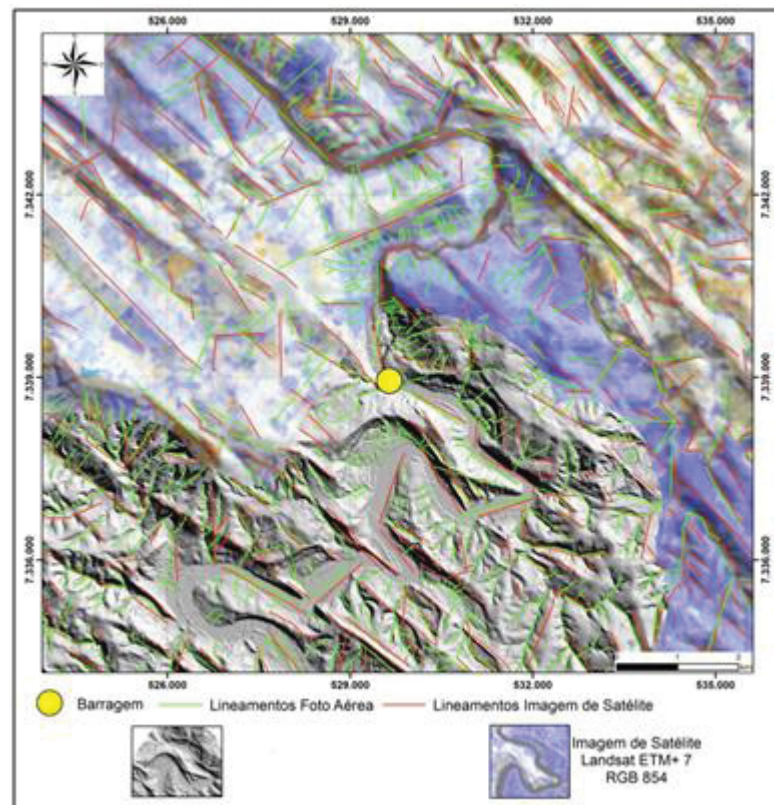


FONTE: SILVA (2012)

4.2.1 Geologia estrutural da região da barragem

Inicialmente realizou-se o mapeamento das principais direções estruturais do relevo por meio da análise em imagens aéreas e orbitais, que são representadas pelos alinhamentos das cristas e vales, extraídos principalmente de modelos tridimensionais de terreno (SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*) e imagem de satélite (figura 20).

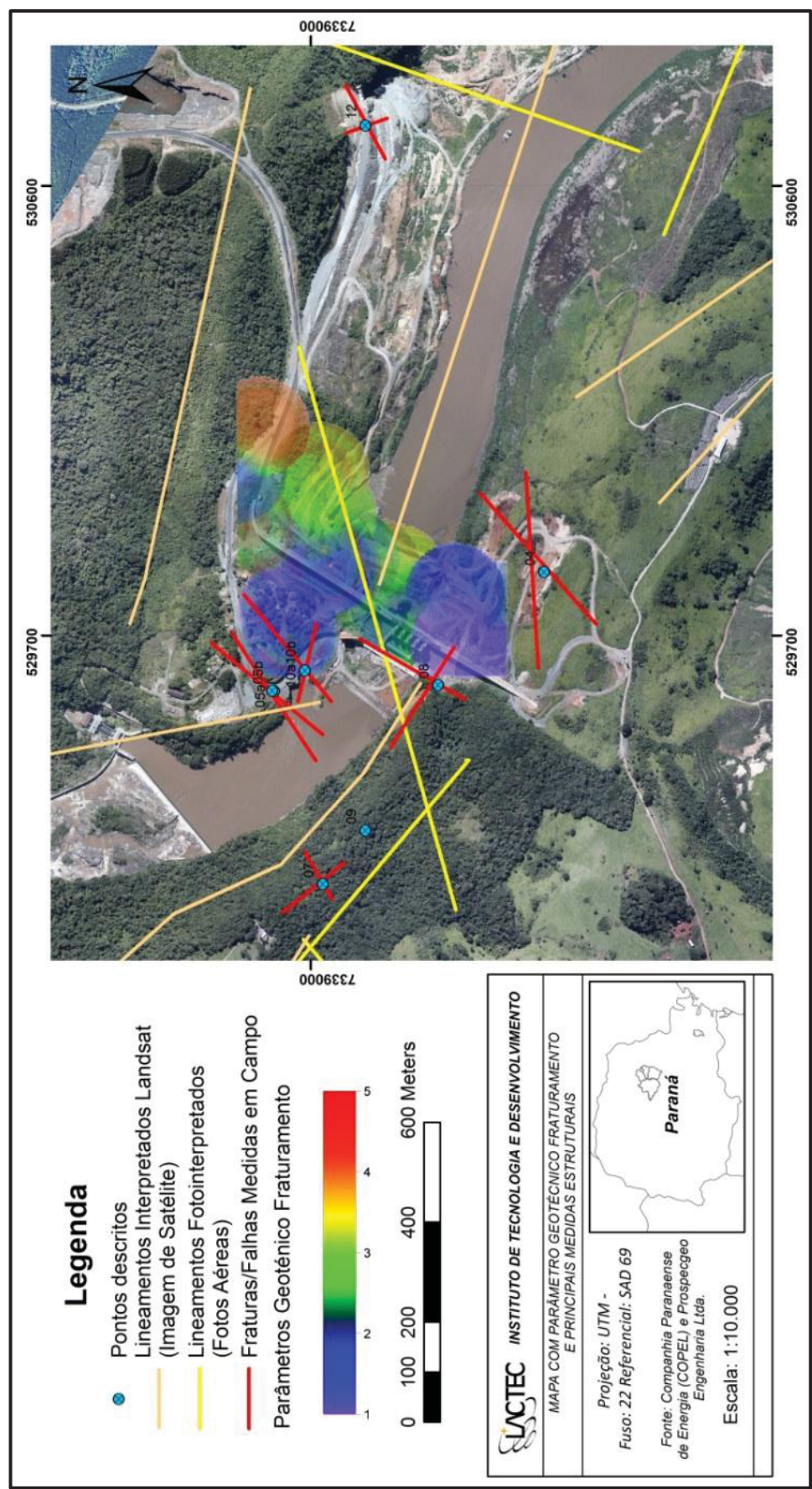
FIGURA 20 - ALINHAMENTO DAS CRISTAS E VALES NA REGIÃO DA BARRAGEM DA USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ



FONTE: ADAPTADO DE FIGUEIRA *et al.*(2015)

Uma vez identificadas as principais feições de relevo, foram realizados mapeamentos geológicos estruturais no entorno da barragem (figura 21). As campanhas de sondagens rotativas realizadas na fase de projeto da usina permitiram identificar uma soleira de diabásio intrudida em folhelhos e siltitos da Formação Irati (FIGUEIRA *et al.* 2015).

FIGURA 21 - GEOLOGIAESTRUTURAL DA REGIÃO DA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ



FONTE: FIGUEIRA et al. (2015)

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Implantação e ampliação da rede gravimétrica

Para viabilizar os levantamentos gravimétricos na barragem, inicialmente foi realizado o transporte do valor da gravidade da estação absoluta, materializada no Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG da UFPR (figura 22), para a estação de gravidade de referência RN-5 implantado próximo à barragem e fora da zona de influência do reservatório (as características e posição desta serão detalhadas na sequência). O transporte do valor da gravidade foi realizado através de um circuito fechado, para o controle dos erros, garantindo um resultado compatível com a precisão da estação de 1ª ordem utilizada como referência. O valor da gravidade na estação LAIG é 978760,377 mGal e pertence a rede gravimétrica brasileira de primeira ordem, cujo valor foi determinado pelo método gravimétrico absoluto.

FIGURA 22 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA ABSOLUTA MATERIALIZADA NO LAIG DA UFPR



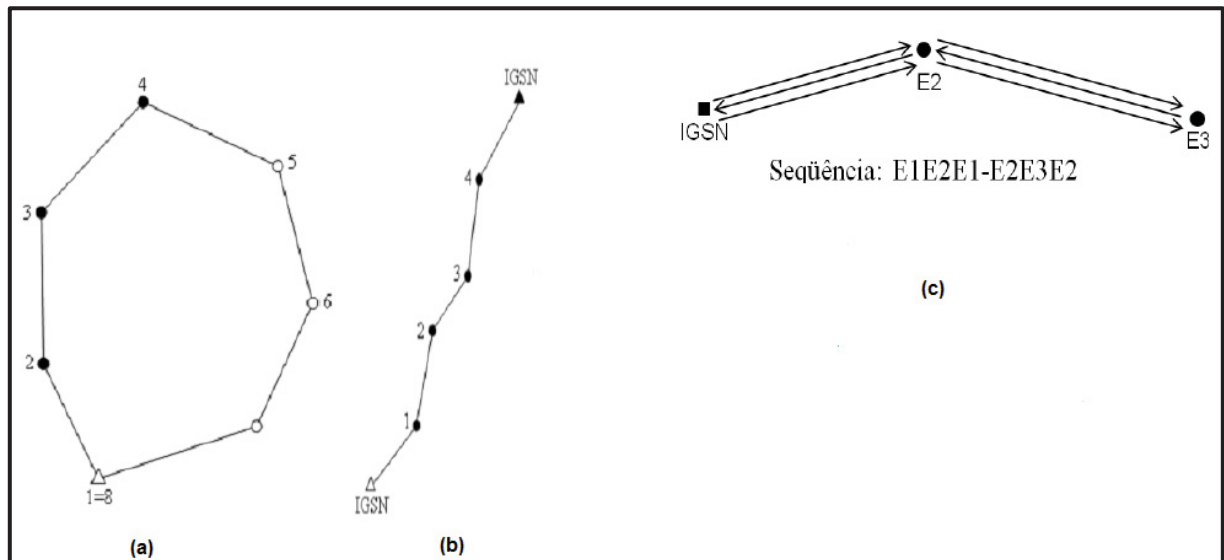
FONTE: O AUTOR, (2018)

Este procedimento é sustentado por Torge (1991), ao afirmar que uma rede deve conter pelo menos uma medida de gravidade absoluta implantada por uma estação e estabelecido num local estável (estabilidade geológica, hidrológica e de pouca sismicidade) e permanente (instituições públicas). Gemael (2012) afirmou que

para assegurar o valor de referência da gravidade, cada país deve estabelecer a sua “rede nacional” de modo a facilitar a tarefa dos geodestas, geólogos e geofísicos que pretendam efetuar densificações gravimétricas.

As redes de densificação podem ser formadas por polígonos, figura 23 (a), ou em linhas que tem como pontos inicial e final estações de ordem superior figura 23 (b), ou em sequências de linhas conhecida como salto de rã, figura 23 (c). Neste trabalho utilizou-se a técnica salto de rã para o estabelecimento da estação na região da barragem.

FIGURA 23 - CIRCUITOS GRAVIMÉTRICOS: (a) CIRCUITO FECHADO; (b) LINHA ABERTA COM PONTO INICIAL E FINAL EM ESTAÇÕES DE ORDEM SUPERIOR; (c) SEQUÊNCIA DE LINHAS CONHECIDAS COMO SALTO DE RÃ.



FONTE: ADAPTADO DE GEMAEL(2012).

A RN-5 anteriormente citada (figura 24) foi adotada como estação de referência para os levantamentos gravimétricos na região da barragem da UHE de Mauá e, o valor da gravidade obtido a partir do transporte é $g=978755,292$ mGal.

FIGURA 24 - ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE REFERÊNCIA RN-5: (a) LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO; (b) VISTA DA ESTAÇÃO.



FONTE: O AUTOR, (2018)

Com o intuito de obter o valor da gravidade para cada estação iniciou-se o trabalho configurando o gravímetro, a saber:

- ✓ O equipamento foi posicionado em cada estação, deixando o mesmo estacionado por cerca de 5 minutos para garantir a estabilidade do sistema elástico;
- ✓ Configurou-se o instrumento para realizar 360 leituras (6 a cada segundo) em cada estação;
- ✓ Acoplou-se ao gravímetro um receptor GPS, na porta “COM 2”, para coletar as coordenadas geodésicas (φ , λ , h) com a finalidade de realizar a correção de maré;
- ✓ Associado ao gravímetro utilizou-se o receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), pela técnica RTK (*Real Time Kinematic*) para obter as mesmas coordenadas geodésicas com maior precisão, para o cálculo e transformações necessárias para a representação das anomalias da gravidade na região do levantamento.

A densificação gravimétrica na região da barragem utilizou o conceito de circuito fechado, sendo a partida e a chegada situada na RN-5. Neste tipo de circuito há a necessidade de cálculo da deriva instrumental, que ocorre devido a mudanças

no comportamento do sistema elástico do gravímetro, de modo que as leituras executadas numa mesma estação, em diferentes horários, não coincidam (KNÖDEL, LANGE e VOIGT, 2007; GEMAEL, 2012). Apesar de o fabricante garantir a inexistência desta deriva, mesmo assim tomou-se este cuidado e verificou-se que, apesar de ser pequeno valor, ela existe.

As datas da densificação gravimétrica e os números de estações medidas por cada campanha são apresentados na tabela 2.

TABELA 2 - DENSIFICAÇÃO GRAVIMÉTRICA

	CAMPANHAS				Número de Estações por campanha
	Dezembro/2014	Setembro/2015	Dezembro/2016	Junho/2017	
Crista da Barragem	-	-	✓	✓	80
Degraus a Jusante	-	-	✓	✓	209
Galeria Superior	✓	✓	-	✓	23
Galeria Inferior	✓	✓	-	✓	17
				TOTAL	329

FONTE: O AUTOR, (2018)

- Campanha não realizada;
- ✓ Campanha realizada.

Inicialmente, o circuito denominado de nº1, composto por 35 estações gravimétricas, das quais 33 estão situadas sobre a crista da barragem, junto à face de montante e duas fora do maciço de CCR da barragem, uma na margem direita PG01 e outra na margem esquerda PG02, (figura 25).

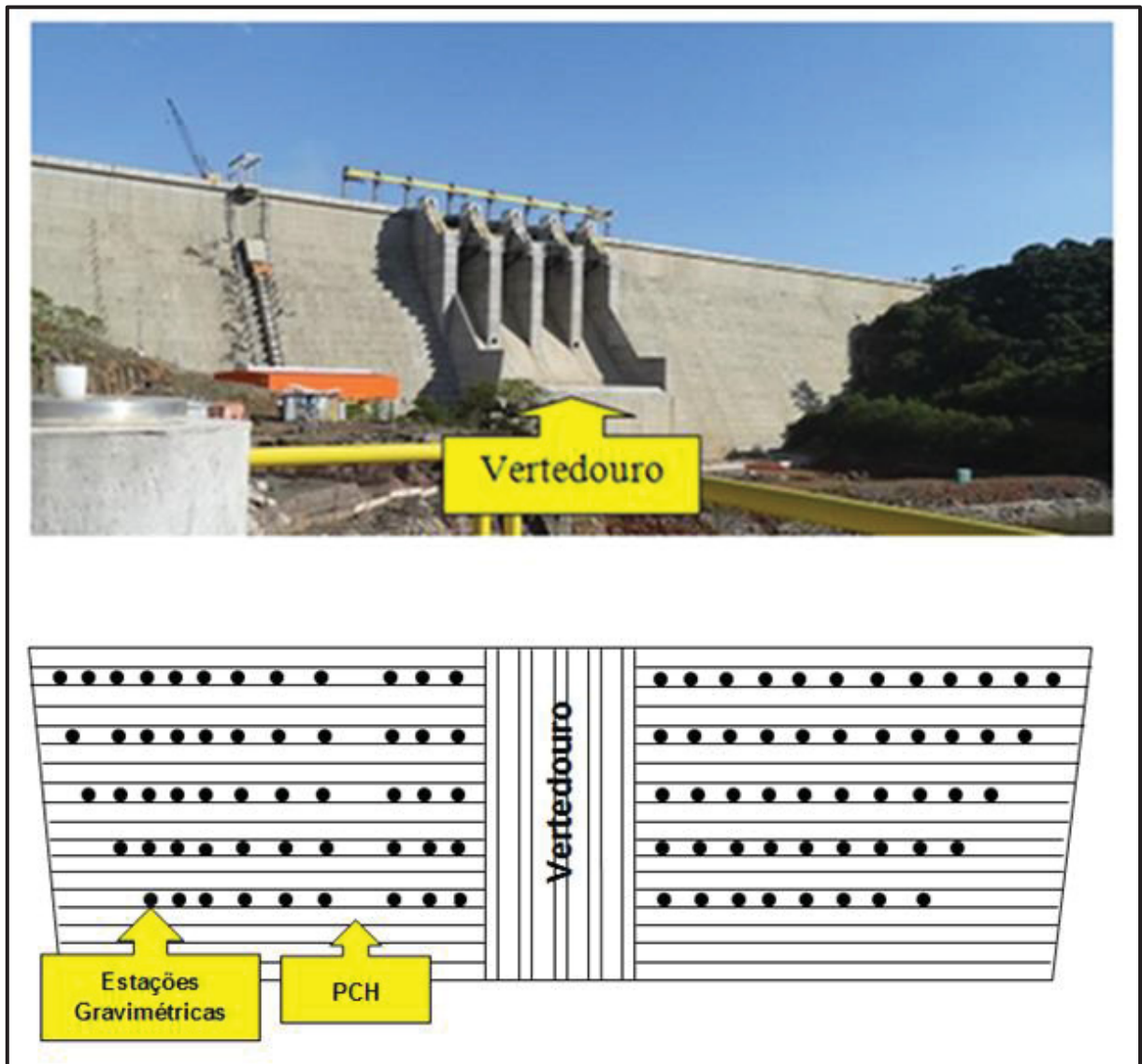
Em dezembro de 2016 realizou-se uma densificação e o circuito nº1 passou a contar com 80 estações na crista ou rodovia PR-239 que utiliza a barragem da UHE de Mauá para transpor o rio Tibagi. Outros circuitos (2, 3, 4, 5 e 6) foram implantados sobre o 2º, 5º, 8º, 11º e 14º degraus à jusante da barragem. Estes possuem respectivamente 54, 45, 43, 42 e 25 estações, sendo mantido o mesmo afastamento, de aproximadamente 10 metros entre as estações da crista da barragem, conforme mostra a figura 26 e 27.

FIGURA 25 - LOCALIZAÇÃODAS ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS SOBRE A CRISTA NA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ



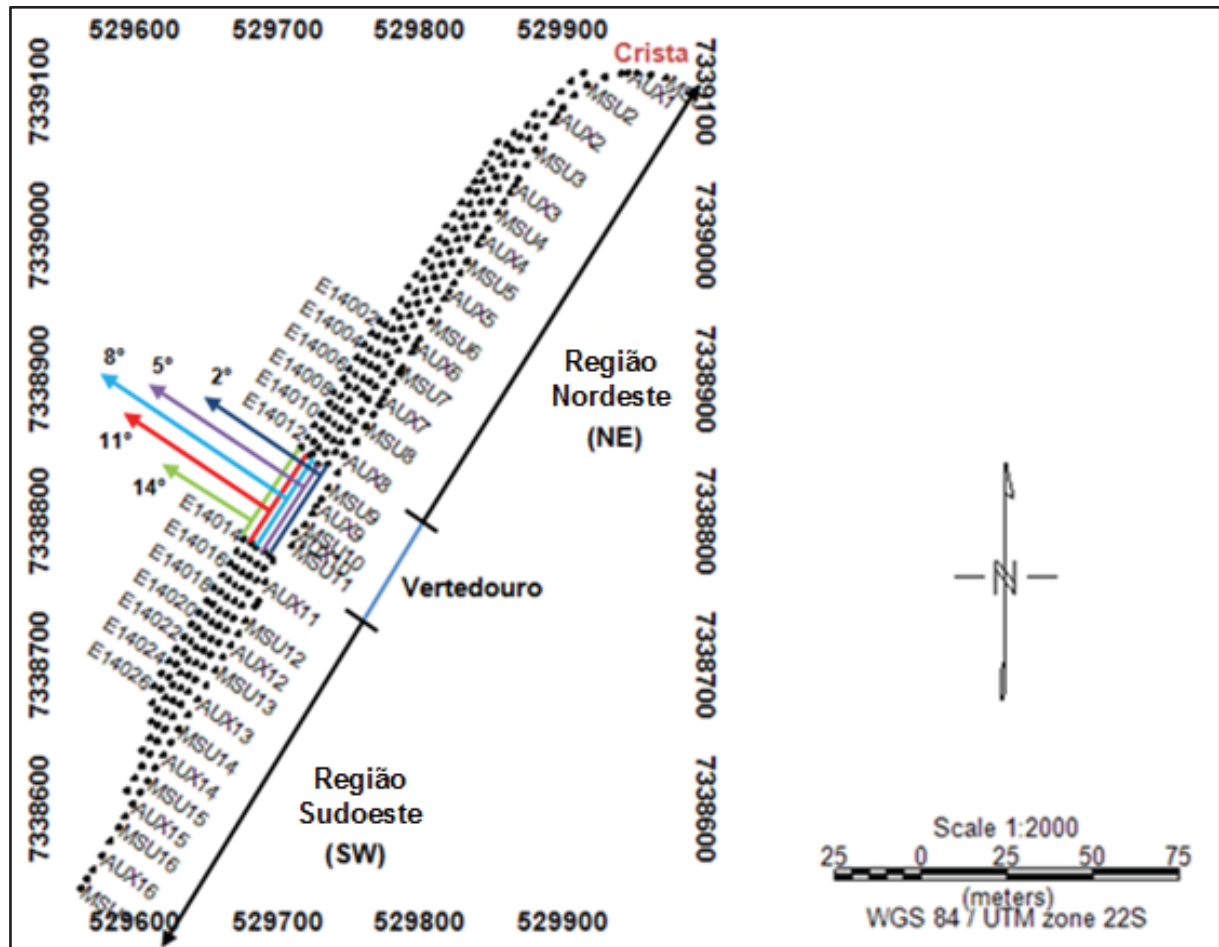
FONTE: O AUTOR, (2018)

FIGURA 26 - BARRAGEM E REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS GRAVIMÉTRICOS À JUSANTE



FONTE: O AUTOR, (2018)

FIGURA 27 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE GRAVIDADE NA CRISTA E DEGRAUS SOBRE A BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ

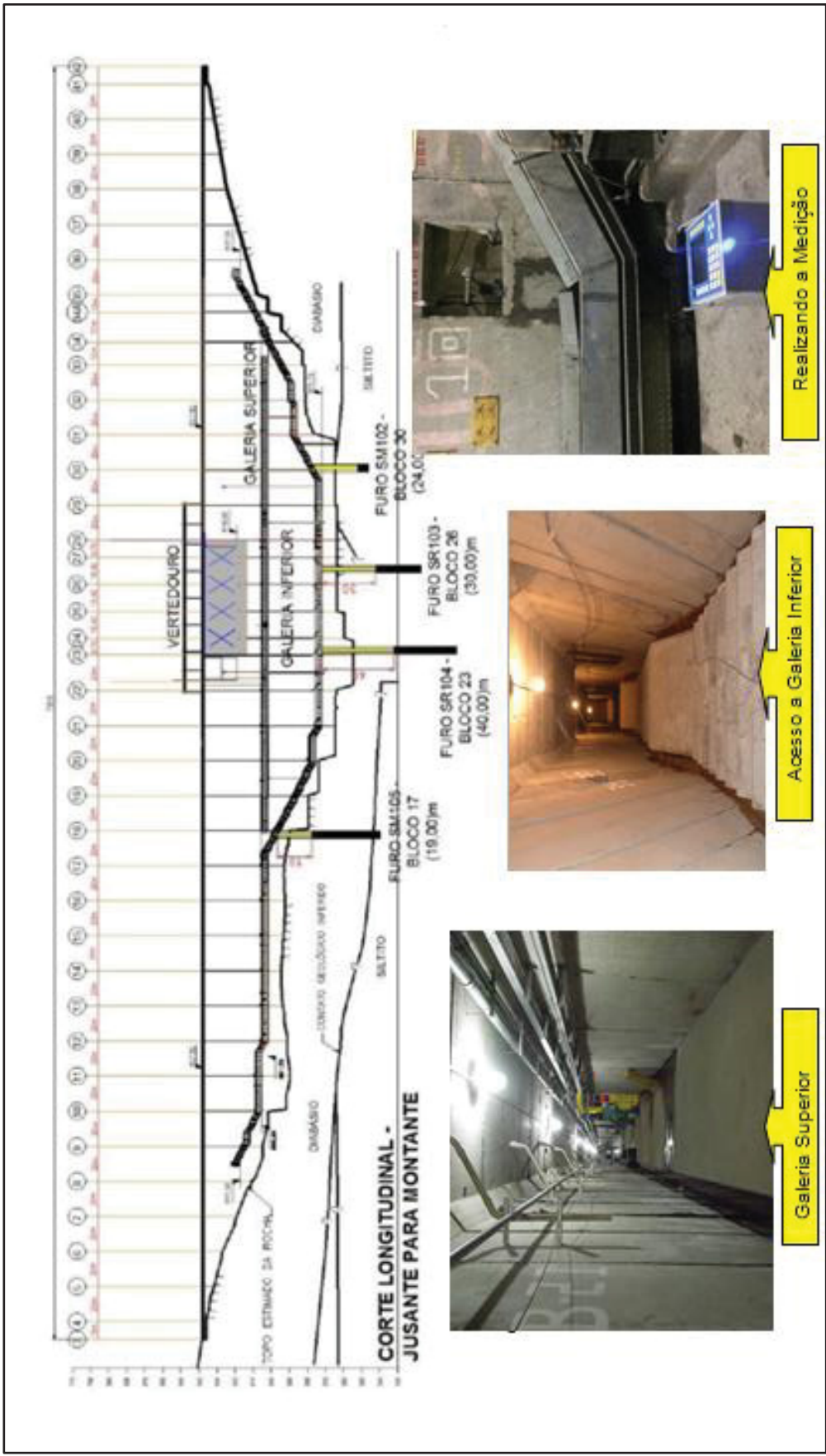


FONTE: O AUTOR,(2018)

Outro levantamento realizado foi formado por 42 estações, sendo 25 na galeria de inspeção superior, 17 na galeria de inspeção inferior.

As estações gravimétricas localizadas nas galerias de inspeção superior e inferior foram estabelecidas juntas aos extensômetros (figura 28) instalados em cada junção de blocos. Esta metodologia foi adotada, pois nestas posições foram determinadas as coordenadas tridimensionais para avaliar o comportamento absoluto do ponto ao longo do tempo, (DA CRUZ, 2015). Estas coordenadas foram utilizadas para o cálculo da correção de maré e para a representação das anomalias.

FIGURA 28 - GALERIAS DE INSPEÇÃO SUPERIOR E INFERIOR E PONTOS DE MONITORAMENTO NO INTERIOR DA BARRAGEM DA UHE DE MAUÁ



FONTE: O AUTOR, (2018)

4.3.1.1 Espaçamento entre as estações

Os levantamentos gravimétricos, além de globais ou regionais, também são realizados em uma escala local ou de detalhe, com espaçamento entre as estações de 100 metros, ou menor, que apesar de não contribuir substancialmente para a cobertura regional, são utilizados para as investigações especializadas, tais como nos levantamentos para a exploração de petróleo, localização de domos de sal, exploração mineral, cubagem jazidas, localização de vazios, como cavidades naturais ou antrópicas (PATERSON e REEVES, 1985).

Karaman, Seyhan e Isik, (2013); Kearey, Brooks e Ian, (2009) afirmam que o espaçamento das estações de uma rede com a finalidade de se executar um levantamento gravimétrico pode variar de uns poucos metros, no caso de levantamentos geotécnicos ou de detalhe para mineração, a vários quilômetros em levantamentos regionais. No projeto de levantamento da Usina Hidrelétrica de Mauá adotou-se um intervalo de amostragem de 10m tendo por fundamento a possibilidade de uma rápida variação do campo da gravidade resultante de variações na densidade do concreto ou no volume de água represada no reservatório.

4.3.2 Processamento dos dados gravimétricos

As estações localizadas na crista e nos degraus a jusante tiveram os valores da gravidade corrigidos do efeito de maré durante as medições em campo, através da ativação da função disponível no gravímetro CG-5. No interior das galerias não é possível obter o sinal GPS ou GNSS. Por este fato, os valores da gravidade das estações nestes locais tiveram o efeito de maré corrigidos posterior às medições, através do software “temare” desenvolvido e disponível no Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia.

Tanto no gravímetro CG-5, como no *software* “temare” as correções do efeito de maré são fundamentadas na equação de Longman. Esta equação utiliza um modelo perfeitamente elástico com fator gravimétrico igual a 1,16. A correção é realizada introduzindo a latitude, longitude e considera o tempo universal coordenado (TUC).

Em seguida foram corrigidas as derivas instrumentais, nomeadamente

estática e dinâmica. A deriva estática está associada à deformação da mola e grandes flutuações de temperatura e pressão, enquanto que a deriva dinâmica está associada a transporte, choques, pequenas variações de temperatura e outros fatores (MILSOM, 2003).

Para cada época de levantamento, a deriva dinâmica foi calculada tendo em consideração a diferença de leitura da gravidade na RN-5, isto é, no início e no fim do circuito, dividido pelo tempo acumulado do levantamento.

$$DD = \frac{Lg_{iRN5} - Lg_{fRN5}}{TAL} \quad (32)$$

Onde:

DD - deriva dinâmica;

Lg_{iRN5} - leitura da gravidade inicial na estação RN5;

Lg_{fRN5} - leitura da gravidade final na estação RN5;

TAL - tempo acumulado do levantamento.

Posterior às correções de maré e deriva instrumental foram calculadas as variações da gravidade de cada estação em relação à estação base (RN-5). O valor da gravidade absoluta de cada estação foi determinado pela adição do valor da variação da gravidade de cada estação, ao valor da gravidade absoluta da estação base conhecida.

As reduções ar livre e Bouguer bem como a correção de terreno (HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2005; NABIGHIAN *et al.*, 2005), foram realizadas através do software “*Oasis montaj*” da Geosoft versão v 8.5.5 disponível no Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia. Para tal, foi criada uma base de dados inicial contendo colunas com informações relativas aos nomes das estações, posicionamento, nomeadamente coordenadas no sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) e coordenadas geográficas no sistema sexagesimal, a elevação (altitude) e o valor da gravidade absoluta.

Para correção de terreno houve necessidade de criar Modelos Digitais de Elevação (MDE) a partir das coordenadas obtidas com o receptor GNSS. Estes modelos foram gerados através da interpolação numérica pelo método da mínima curvatura com células regulares de 2,5 x 2,5 m. Este método usa polinômios para

criar uma superfície que minimize a respectiva curvatura de modo que resulte em uma superfície suave que passa através dos pontos de amostragem (BRIGGS, 1974; DENTITH e MUDGE, 2014).

Para correção de terreno houve também a necessidade de introduzir entre vários parâmetros, o valor da densidade de terreno. O embasamento da barragem é constituído por uma pequena espessura de diabásio que possui densidade entre 2,6 e 3,0 g/cm³ e abaixo desta camada por siltitos da Formação Irati de 2,4 a 2,8 g/cm³ conforme informações de densidades na tabela 3. Assim, a densidade média adotada para o embasamento da barragem é de 2,7 g/cm³.

TABELA 3 - DENSIDADE MÉDIA DE MATERIAIS

MATERIAL	DENSIDADE (g/cm³)	% DE EMPOLAMENTO
Ardósia	2,7 - 2,8	30
Argila densa molhada	1,7	33
Areia molhada	2,2	-
Areia seca	1,9	12
Arenito	2,5	40 - 60
Barro	1,6	20
Basalto	2,8 - 3,0	33
Carvão, antracite	1,3	35
Carvão betuminoso	1,1	35
Cascalho seco	1,9	12
Cinzas, carvão mole comum	0,64 - 0,72	8
Diabásio	2,6 - 3,0	-
Diorito	2,6 - 3,0	-
Dolomito	2,8 - 2,9	-
Gipsita	2,3 - 3,3	-
Gnaisse	2,6 - 2,9	-
Granito	2,7	50 - 80
Mica xisto	2,5 - 2,9	-
Minério de chumbo (galena)	7,5	-
Minério de cobre (azurita)	2	35
Minério de ferro (hematita)	4,5 - 5,3	-
Minério de ferro (limonita)	3,6 - 4,0	-
Minério de ferro (magnetita)	4,9 - 5,2	-
Quartzito	2,0 - 2,8	-
Rocha calcárea (detonada)	2,6	67 - 75
Rocha calcárea (mármore)	2,7	67 - 75
Rocha dura (fragmentada)	3,2	-
Rocha dura (bem demolida)	2,4	50
Rocha e pedras moídas	1,9 - 2,1	35
Rocha de sal	2,1 - 2,6	-
Siltito lamelar	2,4 - 2,8	33
Talco	2,6 - 2,8	-
Terra seca compacta	1,6	25
Terra molhada	2	25
Terra com areia e cascalho	1,8	18
Terra e rochas misturadas	1,4 - 1,7	30
Xisto	2,4 - 2,8	33

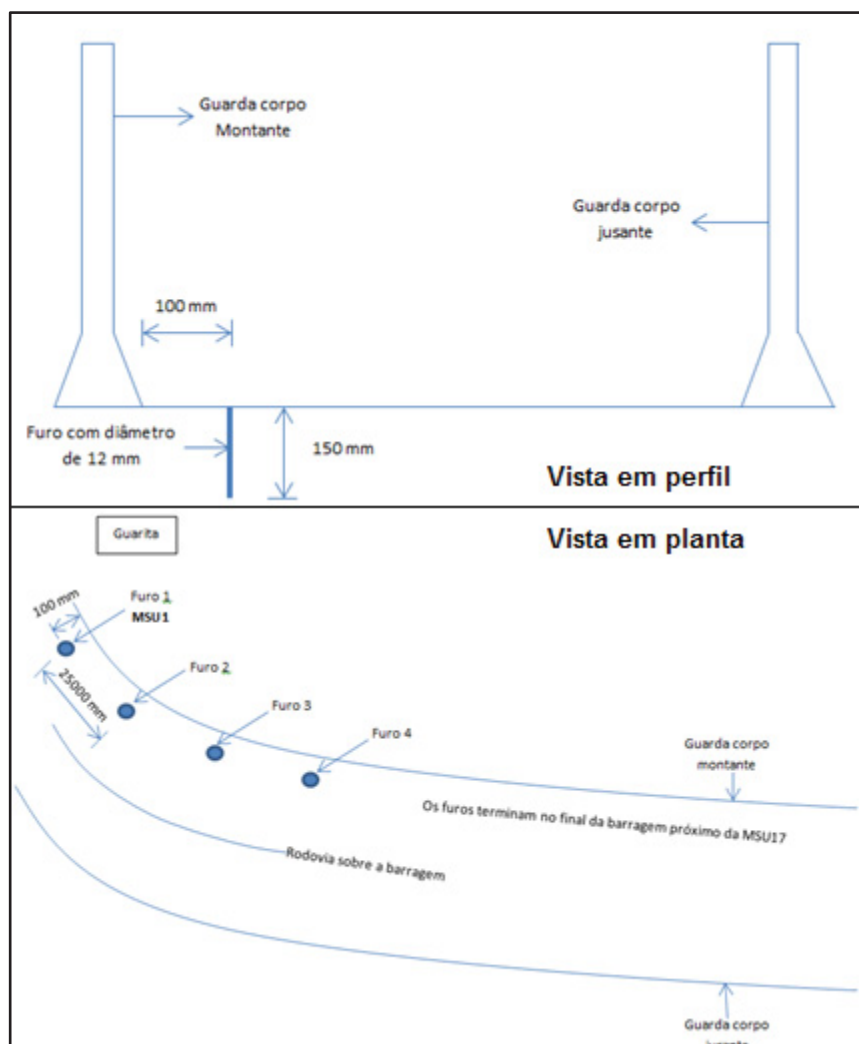
FONTE:BRITANITE (2017)

4.3.3 Levantamento de eletroresistividade

O levantamento de eletroresistividade foi executado no dia 27 de Novembro de 2017 e envolveu uma única linha de Caminhamento Elétrico (CE) 2D, com 650 m de perfil adquirido com arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=25\text{ m}$) e seis níveis de profundidade de investigação.

Para o estabelecimento da linha de Caminhamento Elétrico 2D foram executadas com uma furadeira, 26 perfurações espaçadas entre si 25 metros, junto ao guarda corpo de montante, como apresenta-sena figura 29. Os furos possuem 12 mm de diâmetro e 150 mm de profundidade, tal que permitiu o posicionamento dos eletrodos de corrente.

FIGURA 29 - PROJETO DE EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE



FONTE: O AUTOR, (2018)

Os dados de caminhamento elétrico 2D (CE2D) foram obtidos por um sistema de aquisição conjunta de Polarização Induzida/Resistividade (IP/RES) composto por dois módulos, um transmissor de corrente VIP 3000W de potência, alimentado por um gerador Honda EM5000S (4,5 KVa), e outro receptor multicanal ELREC Pro, ambos de fabricação *Iris Instruments-Canadá*. O transmissor é conectado aos elétrodos de corrente A e B, enquanto o receptor é acoplado aos de potencial M e N. As Figuras 30 e 31 mostram, respectivamente, o transmissor e o receptor. Conforme mencionado, os dados de produção envolveram 650 m de caminhamento elétrico (CE), em uma única linha.

O processamento dos dados de CE2D foi realizado através dos softwares *Geosoft Oasis Montaj™*, versão 8.5.5 e *Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP*.

FIGURA 30 - TRANSMISSOR UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D).



FONTE: FERREIRA (2009)

FIGURA 31 - RECEPTOR UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DE ELETRORESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO 2D).



FONTE: O AUTOR, (2018)

4.3.4 Transformação de coordenadas para o sistema da barragem

As coordenadas geodésicas (φ , λ e h) das estações gravimétricas na crista e a jusante da barragem foram obtidas pelo receptor GNSS da marca *Hiper* fabricado pela *Topcon*, mostrado na figura 32.

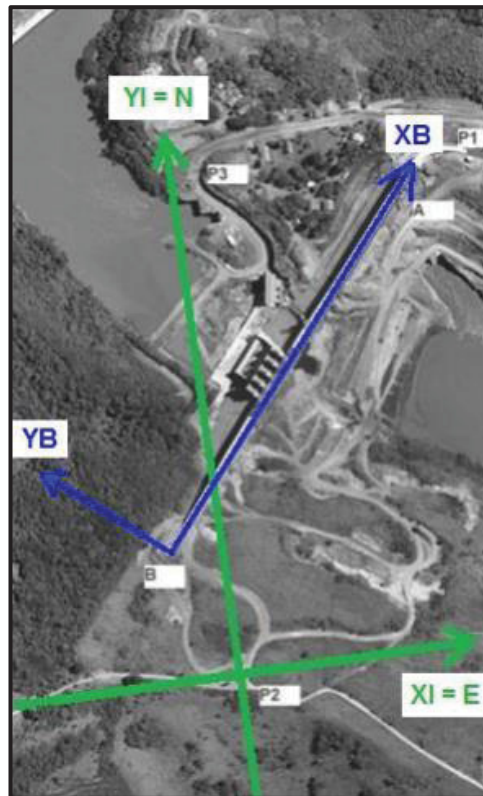
FIGURA 32 - RECEPTOR GNSS HIPER DA TOPCON



FONTE: O AUTOR, (2018)

Com a finalidade de facilitar a compreensão e interpretação do posicionamento das anomalias da gravidade houve necessidade de transformar estas coordenadas para o sistema cartesiano local (Sistema da Barragem), onde o eixo “XB” é paralelo ao eixo da crista da barragem, o eixo “YB” é perpendicular ao eixo “XB” no plano horizontal com a direção positiva no sentido do rio e, o eixo “ZB” está na direção vertical com sentido positivo para o zênite, formando um sistema dextrógiro. Na figura 33 se observamos sistemas da barragem e Geodésico Local caracterizado pelos eixos $YI = N$ e $XI = E$ (GRAÇA, 2014; DA CRUZ, 2015).

FIGURA 33 - SISTEMA GEODÉSICO LOCAL E O SISTEMA DA BARRAGEM



FONTE: DA CRUZ (2015)

Segundo Da Cruz (2015), os parâmetros de transformação foram determinados a partir da adoção de três pontos homólogos, nomeadamente três pilares de centragem forçada que compõem a rede geodésica fundamental. Para a definição do alinhamento longitudinal (eixo XB) foram arbitradas as coordenadas de dois pontos de monitoramento fixados sobre a crista. Assim, as coordenadas geodésicas dos cinco pontos mencionados foram transformadas em coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais através da equação (33).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ (N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (33)$$

Onde:

X, Y, Z – são coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais;

φ, λ, h – são latitude, longitude e altitude geodésicas;
 N – grande normal.

$$N = \frac{a}{(1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (34)$$

a : Semieixo maior do elipsoide;

$e^2 = 2f - f^2$: primeira excentricidade ao quadrado;

$f = \frac{a-b}{a}$: Achatamento do elipsoide;

b : Semieixo menor do elipsoide.

Com as coordenadas no Sistema Geodésico Cartesiano (SGC) determinado, seguiram-se a determinação das coordenadas no Sistema Geodésico Cartesiano Local (SGCL) com base no modelo a seguir, adotando o pilar PG02 como origem.

$$\begin{bmatrix} XI \\ YI \\ ZI \end{bmatrix} = M1 \cdot M3 \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde:

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_o & \cos \varphi_o \\ 0 & -\cos \varphi_o & \sin \varphi_o \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$M3 = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_o & \cos \lambda_o & 0 \\ -\cos \lambda_o & -\sin \lambda_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Assim,

$$\begin{bmatrix} XI \\ YI \\ ZI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_o & \cos\varphi_o \\ 0 & -\cos\varphi_o & \sin\varphi_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin\lambda_o & \cos\lambda_o & 0 \\ -\cos\lambda_o & -\sin\lambda_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (38)$$

Onde:

XI, YI, ZI – Coordenadas no SGCL;

φ_o, λ_o – Latitude e longitude geodésica do ponto origem;

X, Y, Z – Coordenadas geodésicas cartesianas do ponto a ser transformado;

X_o, Y_o, Z_o – Coordenadas geodésicas cartesianas do ponto de origem.

E finalmente estas coordenadas foram transformadas para o Sistema da Barragem utilizando o modelo matemático a seguir, que realiza transformação ponto a ponto de um sistema para outro:

$$\begin{bmatrix} XB \\ YB \\ ZB \end{bmatrix} = R^{-1} \cdot \begin{bmatrix} XI - XI_o \\ YI - YI_o \\ ZI - ZI_o \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\theta = \frac{y - y_o}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}} \quad (41)$$

Onde:

XB, YB, ZB : Coordenadas no Sistema da Barragem;

θ : Ângulo de rotação entre os sistemas;

XI_o, YI_o, ZI_o : Coordenadas do ponto de origem no SGCL;

XI, YI, ZI : Coordenadas no SGCL do ponto a ser transformado.

5 RESULTADOS

5.1 COORDENADAS NO SISTEMA DA BARRAGEM

Na sequência, (tabelas 4, 5 e 6), apresentam-se as coordenadas no sistema da barragem para adequar as direções de interesse no monitoramento. Cabe salientar que para os cálculos da gravidade e das anomalias da gravidade utilizaram-se coordenadas geográficas.

TABELA 4 - COORDENADAS DA CRISTA NO SISTEMA DA BARRAGEM

COORDENADAS NO SISTEMA DA BARRAGEM											
ESTAÇÃO	X(m)	Y(m)	Z(m)	ESTAÇÃO	X(m)	Y(m)	Z(m)	ESTAÇÃO	X(m)	Y(m)	Z(m)
MSU1	895,13	150,07	-1,55	AUX5B	673,71	200,26	-1,54	AUX11	448,99	202,94	-1,52
MSU1A	891,84	160,09	-1,54	MSU6	664,55	200,26	-1,55	AUX11A	435,44	200,03	-1,50
MSU1B	887,67	169,41	-1,55	MSU6A	650,22	200,23	-1,52	AUX11B	433,25	200,00	-1,50
AUX1	884,67	174,14	-1,54	AUX6	644,66	200,22	-1,54	AUX11C	431,21	200,04	-1,51
AUX1A	881,59	178,20	-1,56	AUX6A	639,10	200,20	-1,55	MSU12	418,89	200,19	-1,50
AUX1B	873,44	186,42	-1,60	AUX6B	626,56	200,19	-1,53	MSU12A	408,49	199,98	-1,51
MSU2	862,13	193,96	-1,54	AUX6C	625,54	200,20	-1,53	AUX12	398,89	199,98	-1,51
MSU2A	851,47	198,09	-1,58	MSU7	624,53	200,23	-1,54	AUX12A	389,03	199,98	-1,51
MSU2B	839,61	200,26	-1,60	MSU7A	623,55	200,26	-1,56	MSU13	378,90	200,06	-1,51
AUX2	833,65	200,49	-1,59	MSU7B	622,48	200,23	-1,56	MSU13A	366,33	199,91	-1,51
AUX2A	827,73	200,46	-1,61	MSU7C	614,43	200,21	-1,53	AUX13	354,58	199,92	-1,49
AUX2B	815,67	200,48	-1,60	MSU7D	607,33	200,17	-1,52	AUX13A	342,15	199,88	-1,48
MSU3	804,78	200,57	-1,58	AUX7	601,59	200,19	-1,54	MSU14	329,95	200,00	-1,48
MSU3A	792,79	200,46	-1,62	AUX7A	595,92	200,20	-1,53	MSU14A	319,24	199,84	-1,50
MSU3B	781,25	200,41	-1,61	AUX7B	588,29	200,13	-1,56	AUX14	309,18	199,87	-1,49
AUX3	775,69	200,41	-1,56	MSU8	578,35	200,25	-1,52	AUX14A	298,47	199,86	-1,52
AUX3A	770,27	200,40	-1,55	MSU8A	565,72	200,14	-1,52	MSU15	288,00	199,96	-1,51
AUX3B	762,32	200,37	-1,56	AUX8	553,43	201,99	-1,51	MSU15A	278,69	199,80	-1,50
MSU4	753,61	200,49	-1,55	AUX8A	540,76	200,09	-1,48	AUX15	268,94	199,84	-1,47
MSU4A	740,14	200,39	-1,55	MSU9	528,52	200,10	-1,47	AUX15A	258,64	199,77	-1,49
AUX4	733,60	200,33	-1,57	MSU9A	519,08	200,12	-1,47	MSU16	249,97	199,86	-1,49
AUX4A	727,16	200,34	-1,58	AUX9	513,07	200,13	-1,46	MSU16A	238,47	199,56	-1,48
MSU5	713,45	200,46	-1,53	AUX9A	506,99	200,13	-1,45	AUX16	227,13	199,28	-1,53
MSU5A	703,95	200,31	-1,56	MSU10	497,67	200,08	-1,50	AUX16A	215,40	199,16	-1,52
MSU5B	695,58	200,29	-1,52	AUX10	489,34	200,12	-1,45	AUX16B	207,48	199,68	-1,51
AUX5	689,06	200,29	-1,55	MSU11	480,58	200,08	-1,43	MSU17	200,00	200,00	-1,44
AUX5A	682,99	200,29	-1,54	MSU11A	464,86	200,98	-1,46				

FONTE: O AUTOR, (2018)

TABELA 5 - COORDENADAS DA GALERIA SUPERIOR NO SISTEMA DA BARRAGEM

COORDENADAS NO SISTEMA DA BARRAGEM			
ESTAÇÃO	X(m)	Y(m)	Z(m)
ENTRADA	795,05	206,03	-21,39
MTJ02	794,63	206,01	-32,18
MTJ03	774,64	206,00	-32,24
MTJ04	754,64	205,95	-35,51
MTJ05	734,58	205,95	-35,55
MTJ06	714,66	205,88	-35,55
MTJ07	694,56	205,91	-35,62
MTJ08	674,50	205,90	-35,71
MTJ09	654,53	205,85	-35,59
MTJ10	634,43	203,45	-35,89
MTJ11	614,33	203,41	-35,89
MTJ12	594,30	203,38	-35,85
MTJ13	574,30	203,39	-35,92
MTJ16	524,60	203,40	-35,94
MTJ17	509,31	203,32	-35,89
MTJ18	478,82	203,27	-35,68
MTJ19	469,23	203,32	-35,69
MTJ20	468,80	203,29	-35,93
MTJ21	448,89	203,26	-35,95
MTJ22	428,74	203,31	-35,61
MTJ23	408,73	203,28	-35,94
MTJ24	388,95	203,21	-35,66
MTJ25	388,69	203,23	-35,99
MTJ27	369,05	203,20	-25,72
SAÍDA	329,51	205,51	-21,39

FONTE: O AUTOR, (2018)

TABELA 6 - COORDENADAS DA GALERIA INFERIOR NO SISTEMA DA BARRAGEM

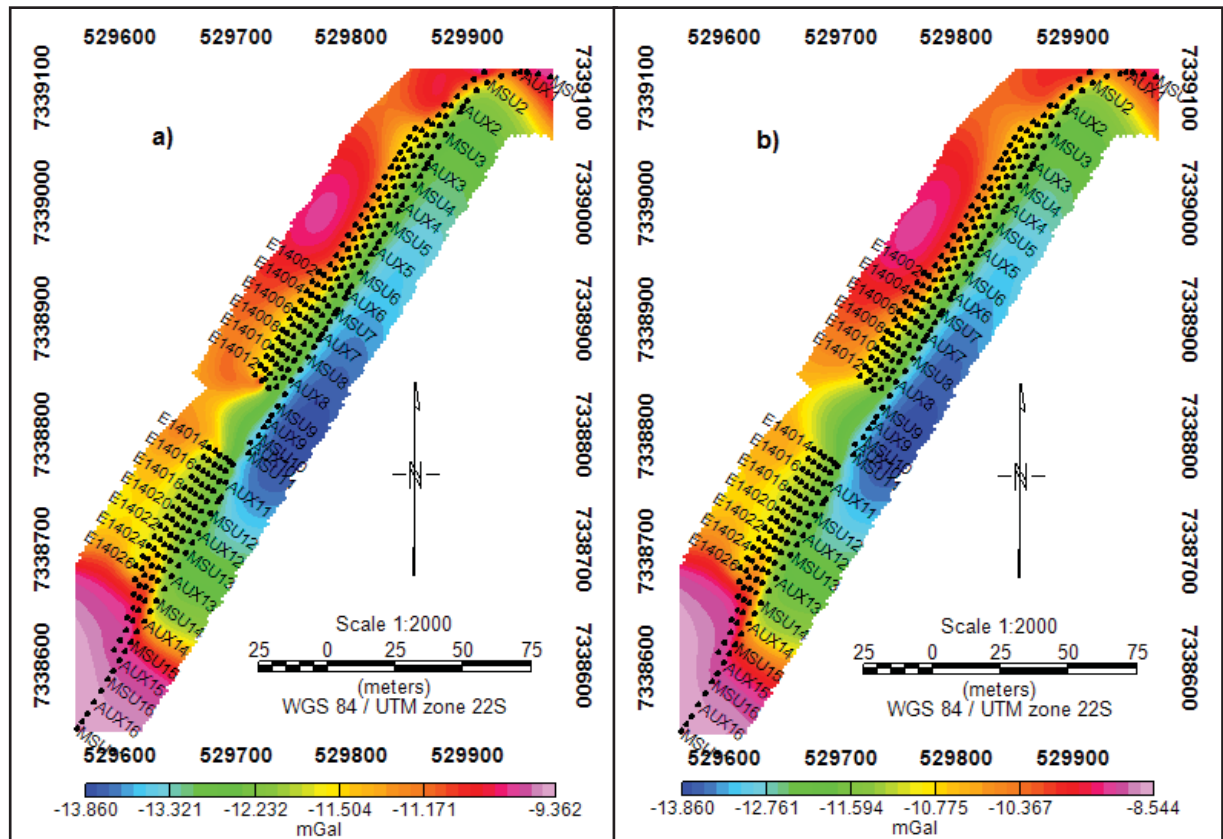
COORDENADAS NO SISTEMA DA BARRAGEM			
ESTAÇÃO	X(m)	Y(m)	Z(m)
MTJ44	635,96	205,26	-43,17
MTJ43	616,06	205,41	-53,45
MTJ42	596,07	205,50	-62,38
MTJ41	575,80	205,44	-66,35
MTJ40	555,97	205,25	-66,36
MTJ39	536,04	205,11	-66,37
MTJ38	526,24	204,96	-66,35
MTJ37	510,92	205,04	-66,35
MTJ36	495,37	205,06	-66,32
MTJ35	480,00	205,00	-66,29
MTJ34	470,39	204,93	-66,29
MTJ33	450,46	204,78	-66,14
MTJ32	430,79	204,75	-62,71
MTJ31	410,96	204,81	-52,31
MTJ30	390,31	204,82	-50,54
MTJ29	371,10	204,49	-45,44
MTJ26	357,81	204,69	-38,49
MTJ27	369,05	203,20	-25,72
SAÍDA	329,51	205,51	-21,39

FONTE: O AUTOR, (2018)

5.2 MAPAS DE ANOMALIAS BOUGUER E RESIDUAL

A figura 34 apresenta os resultados do levantamento gravimétrico na forma de mapa de anomalia Bouguer. Contudo, as anomalias Bouguer, frequentemente encerram vários comprimentos de onda. Algumas podem ser de carácter regional, às quais podem estar sobrepostas anomalias de menor comprimento de onda, consideradas locais (residuais). Este fato obriga a utilização de filtros para separar as anomalias. A caracterização de regional e residual depende da escala do problema.

FIGURA 34 – MAPAS DE ANOMALIA BOUGUER: a) JUNHO 2017; b) DEZEMBRO 2016.

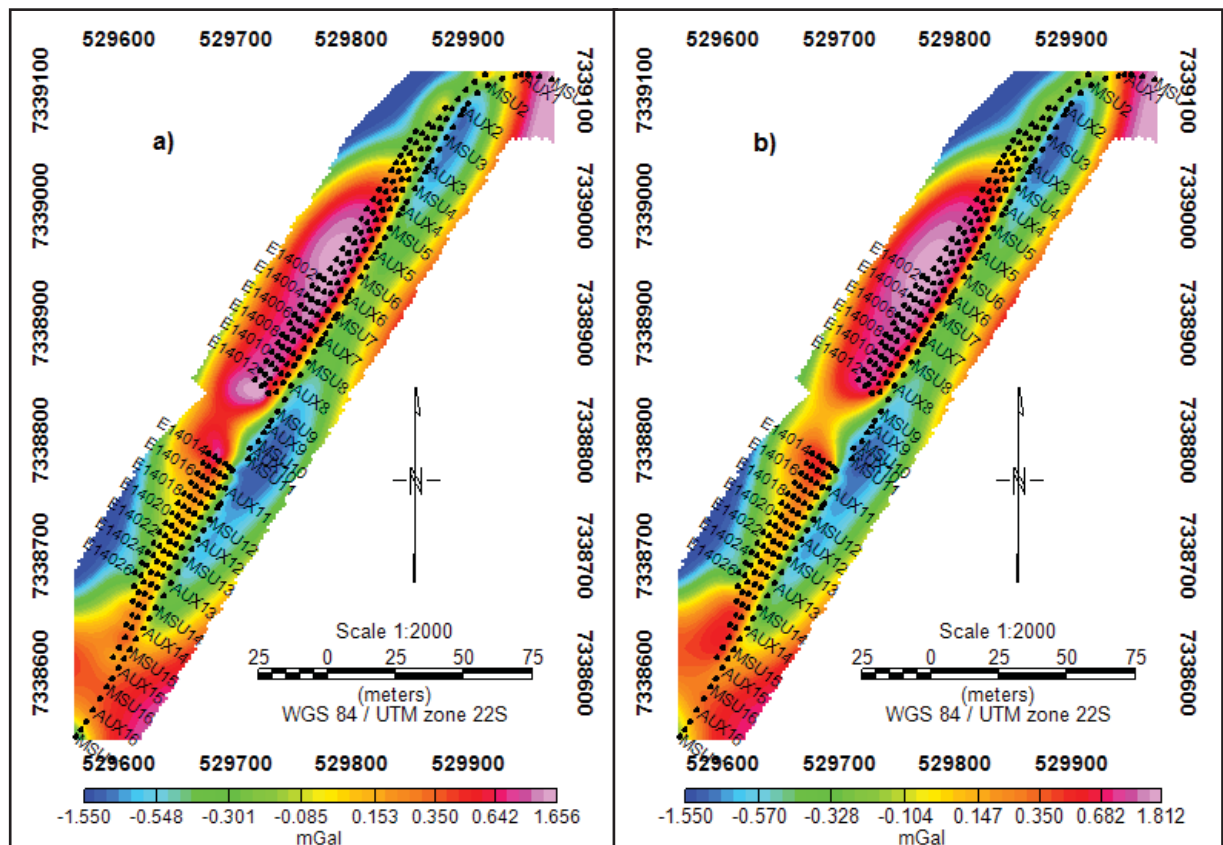


FONTE: O AUTOR, (2018)

O conceito de filtragem em qualquer forma de processamento de dados envolve retenção e/ou aprimoramento da porção desejada do sinal e eliminação ou supressão da parte indesejada, buscando separar componentes mais profundos dos menos profundos nos dados e clareza com a qual esses componentes podem ser observados pelo intérprete. As duas principais classes de filtros observados são: filtros passa-alto; os que retêm o conteúdo de frequência mais alta nos dados, ou seja, os comprimentos de onda mais curtos, por isso espera-se que estes enfatizem fontes mais rasas em dados gravimétricos. Filtros passa-baixo; os que retêm baixas frequências nos dados, logo os comprimentos de onda maiores e, portanto, espera-se que estes enfatizem fontes mais profundas (ISLES, RANKIN e LEIGH, 2013).

Com base nos comentários anteriores e após vários testes, aplicou-se à anomalia Bouguer um filtro polinomial do segundo grau, a partir do qual se obteve o mapa de anomalia residual (figura 35).

FIGURA 35–MAPAS DE ANOMALIA RESIDUAL: a) JUNHO 2017; b) DEZEMBRO 2016.



FONTE: O AUTOR, (2018)

Os mapas de anomalia residual apresentado na figura 35 mostram várias anomalias negativas. As principais estão situadas na região Nordeste (NE) e no vertedouro (região central), enquanto as menos expressivas se localizam na região Sudoeste(SW). Porém, o concreto CCR é um material heterogêneo e considerando a dosagem granulométrica dos materiais de adensamento, a sua densidade varia aproximadamente de 2,3 a 2,6 g/cm³ (ANDRIOLO, 1989), valores que pressupõem o aparecimento somente de anomalias residuais positivas. Este cenário remete-as a uma análise perfil a perfil sobre a barragem, buscando identificar com maior precisão posicionamento das anomalias.

5.3 PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAISNA CRISTA E NOS DEGRAUS

As figuras 36 e 37 mostram os perfis de anomalias residuais na crista e nos degraus a jusante da barragem referente a junho de 2017 e dezembro de 2016.

FIGURA 36 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA CRISTA E NOS DEGRAUS A JUSANTE DA BARRAGEM – JUNHO DE 2017

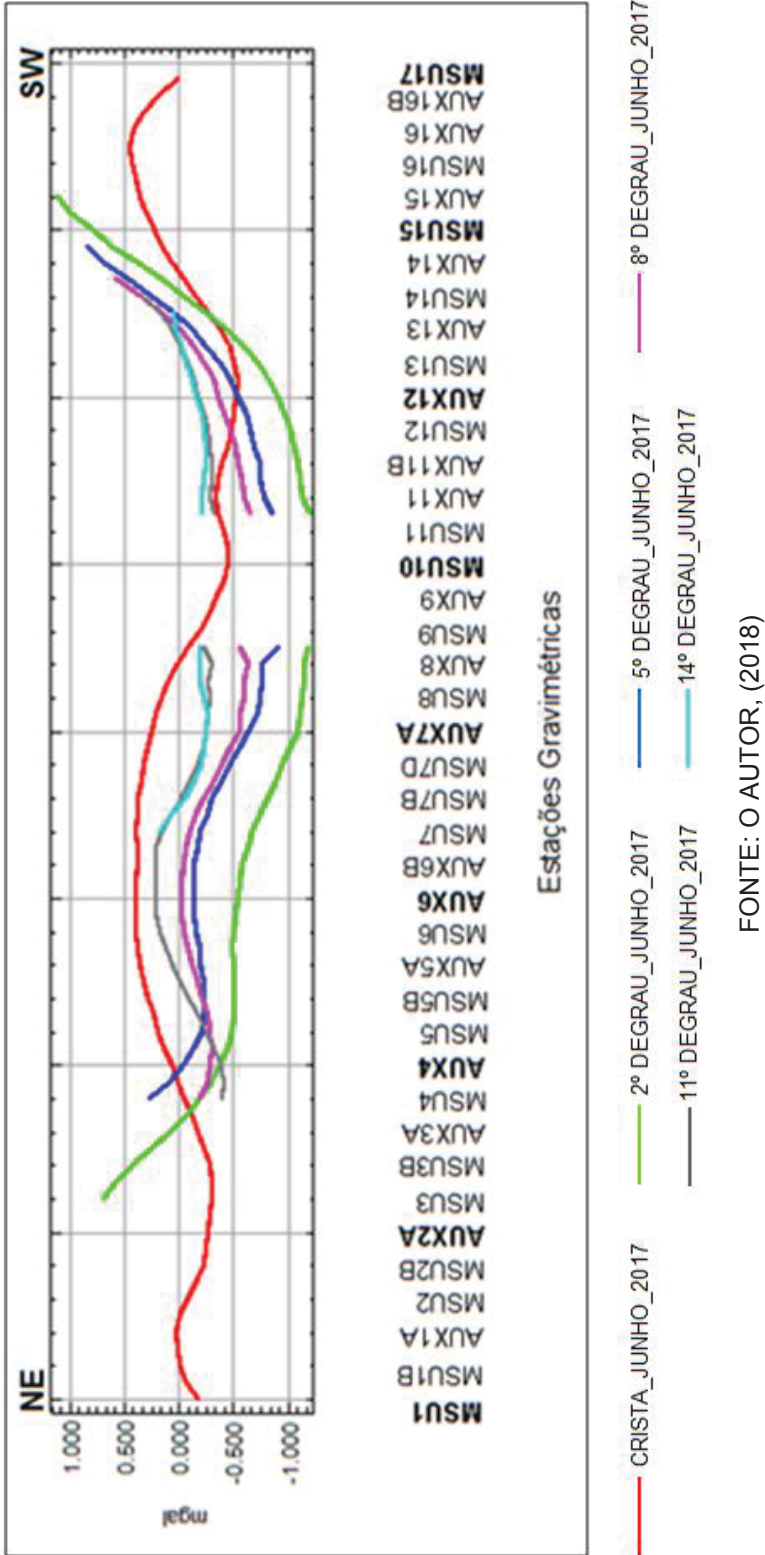
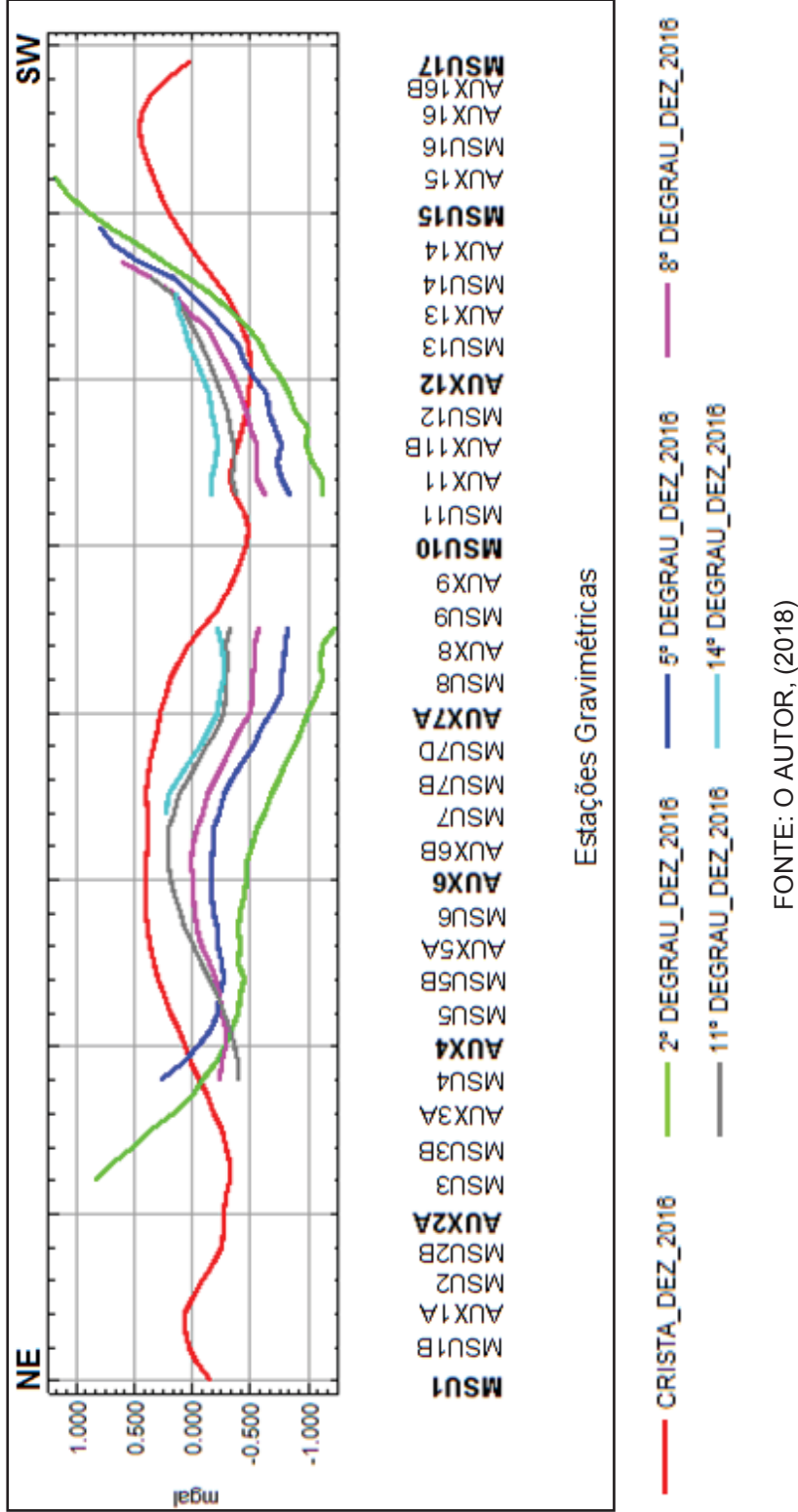


FIGURA 37 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA CRISTA E NOS DEGRAUS A JUSANTE DA BARRAGEM – DEZEMBRO DE 2016



Para os perfis dos degraus, a anomalia regional foi determinada pela aplicação de um filtro polinomial do 1º grau, com exceção dos perfis do décimo primeiro degrau e da crista da barragem (rodovia) onde foi empregado um filtro do 2º grau, em razão de melhor ajuste. A anomalia residual foi obtida pela subtração entre a anomalia Bouguer e a anomalia regional.

Nas figuras 36 e 37 observa-se que o perfil da crista da barragem (rodovia, com altitude de 638m) apresenta duas anomalias negativas, nomeadamente na região NE entre as estações AUX1A e MSU4 e na região SW entre as estações AUX8 e AUX14.

No perfil do 2º degrau (com altitude de 625m) nota-se uma tendência de anomalias negativas na região NE, entre as estações AUX3A e MSU5B em correspondência a comportamento semelhante, entre as estações MSU4 e MSU5B do 5º degrau (altitude de 618m).

Na região central nota-se, em todos os degraus, uma tendência de anomalias negativas a partir da estação AUX7A, passando pelo vertedouro (sem amostragem entre as estações AUX8 e AUX11) até a estação MSU15 (região SW).

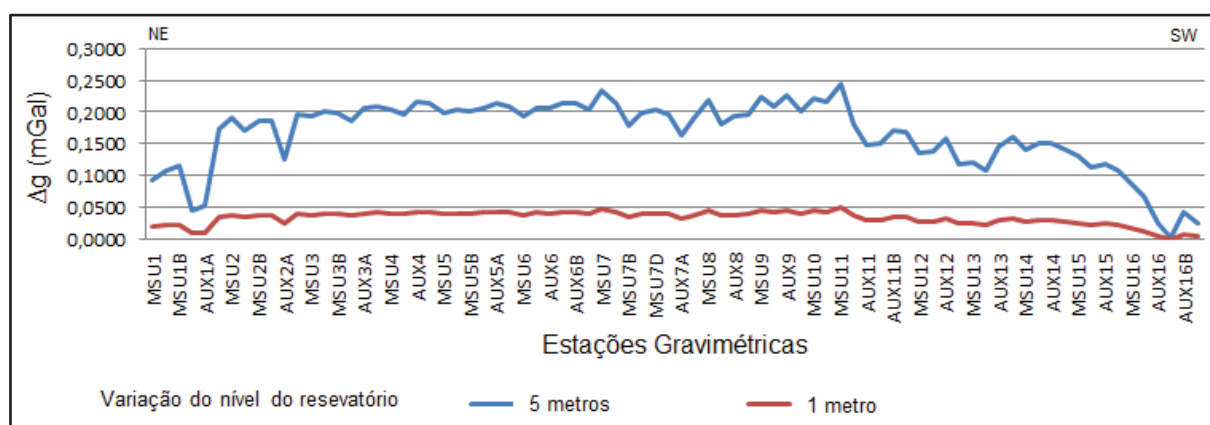
Por outro lado, observa-se em todos os degraus, entre as estações MSU5 e AUX7A (região NE), um alto gravimétrico, o qual é mais representativo nos degraus 11º, 8º e 5º (Figura 36 e 37), com altitudes de 603m, 611m e 618m, respectivamente.

Analisando o que é observado nas figuras 36 e 37 é possível identificar a influência da fonte causadora de variações na anomalia residual. As anomalias negativas na região NE configuram um baixo gravimétrico que pode estar associado à presença de água no túnel de desvio, aberto para o desvio do rio na época da construção da barragem. Este túnel foi posteriormente fechado com concreto convencional de densidade igual a $2,4 \text{ g/cm}^3$. As anomalias negativas na região central configuram baixos gravimétricos que podem ser explicado pela maior profundidade do reservatório e consequente maior altura da lâmina d'água. Já o alto gravimétrico região NE pode refletir o CCR menos saturado, ou mesmo estar associada a maior espessura de soleira (sill) de diabásio situado no maciço rochoso da fundação, ou ainda, associado aos diques de diabásio (densidade média de $2,78 \text{ g/cm}^3$), que são comuns em toda a área de estudo (CASTRO, FERREIRA e ANGULO, 2008).

5.3.1 Variação da gravidade na crista com o nível do reservatório

Outra análise efetuada diz respeito às variações da gravidade com a variação do nível do reservatório. Na campanha de dezembro de 2016 o nível médio do reservatório era de 630m, com valor máximo da gravidade calculada igual a 978757,671 mGal; mínimo 978753,234 mGal e médio entre as estações 978754,550 mGal; enquanto que na campanha de Junho de 2017, o nível do reservatório era 635m, com valor máximo da gravidade calculada igual a 978757,713 mGal; mínimo 978753,443 mGal e médio entre as estações 978754,715mGal. A figura 38 mostra o gráfico da variação da gravidade na crista considerando a variação do nível do reservatório para as campanhas mencionadas anteriormente.

FIGURA 38 - VARIAÇÃO DA GRAVIDADE NA CRISTA COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIO



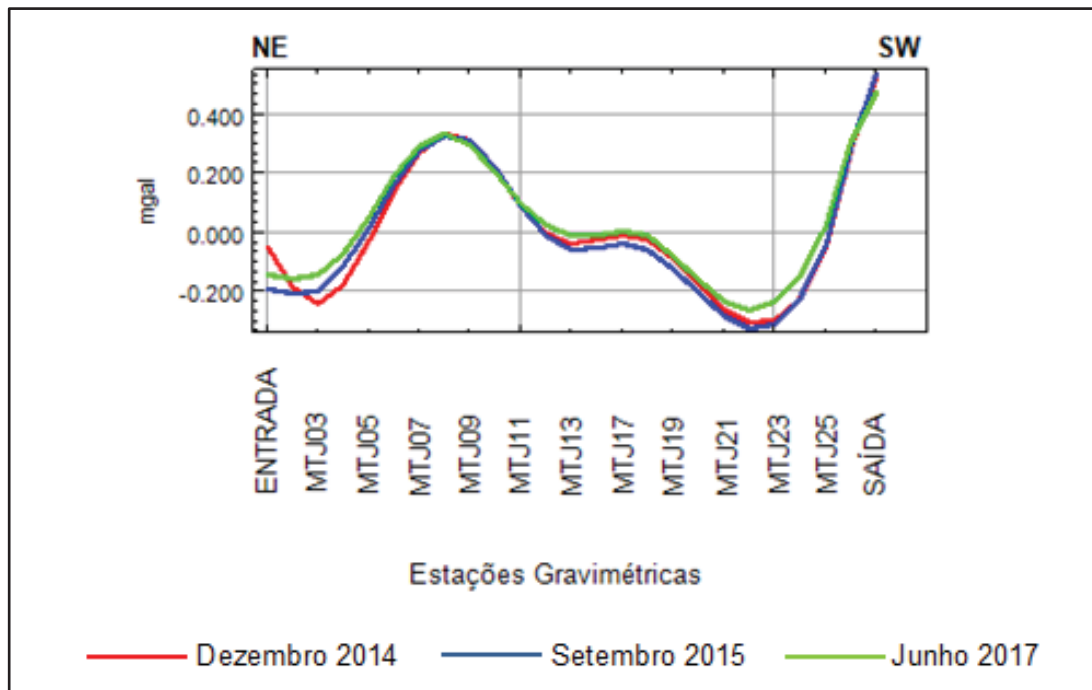
FONTE: O AUTOR, (2018)

A partir da figura 38 constata-se que, o aumento do nível de reservatório em 5m ocasionou uma variação máxima da gravidade igual a 0,2446mGal; média igual a 0,1655 mGal e mínima igual a 0,0027 mGal. A partir destes valores foi calculada a variação da gravidade considerando o aumento do nível de reservatório em 1 m, cujos valores obtidos são 0,0489mGal; 0,0331 mGal e 0,0005 mGal para máximo, médio e mínimo, respectivamente. Utilizando o valor médio do gradiente normal da gravidade (0,3086mGal/m) como referência, pode-se afirmar que o aumento do reservatório em 1 m corresponde a 15,9 % de variação máxima da gravidade, enquanto que o aumento do reservatório em 5 m, corresponde a 79,3 % de variação máxima da gravidade, em cada estação.

5.4 PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NAS GALERIAS

Os perfis de anomalias residuais na galeria superior e inferior são apresentados nas figuras 39 e 40, respectivamente.

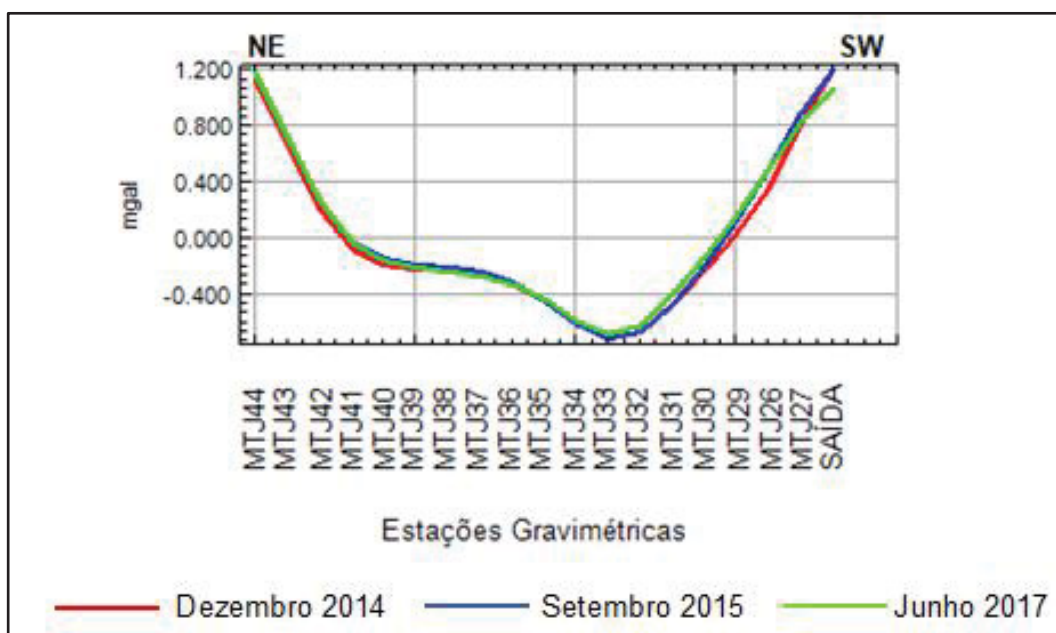
FIGURA 39 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA GALERIA SUPERIOR



FONTE: O AUTOR, (2018)

Sinais gravimétricos de interesse são observados em todos os perfis da figura 39, nomeadamente, o alto gravimétrico entre as estações MTJ05 $\approx 535\text{ m}$ (AUX4) e MTJ12 $\approx 394\text{ m}$ (AUX7A) localizado entre as estações MTJ11 e MTJ13. Baixos gravimétricos entre as estações “ENTRADA” $\approx 595\text{ m}$ (MSU3A) e MTJ05 $\approx 535\text{ m}$ (AUX4) na região NE e entre as estações MTJ18 $\approx 279\text{ m}$ (MSU11) e MTJ25 $\approx 189\text{ m}$ (AUX12A), localizadas a partir do vertedouro (região central) em direção à região SW.

FIGURA 40 - PERFIS DE ANOMALIAS RESIDUAIS NA GALERIA INFERIOR



FONTE: O AUTOR, (2018)

Baixo gravimétrico é observado em todos os perfis da figura 40. Este ocupa a extensão de toda galeria inferior, entre as estações MTJ44 $\approx 435 m$ (AUX6A) e a “SAÍDA” $\approx 130 m$ (MSU14).

O baixo gravimétrico na região NE pode estar associado à presença de água notúnel de desvio, aberto para o desvio do rio na época de construção da barragem e posteriormente fechado com o concreto convencional para o enchimento do reservatório. Enquanto que na região central em direção à região SW pode estar associado ao concreto mais saturado devido ao maior acúmulo de água.

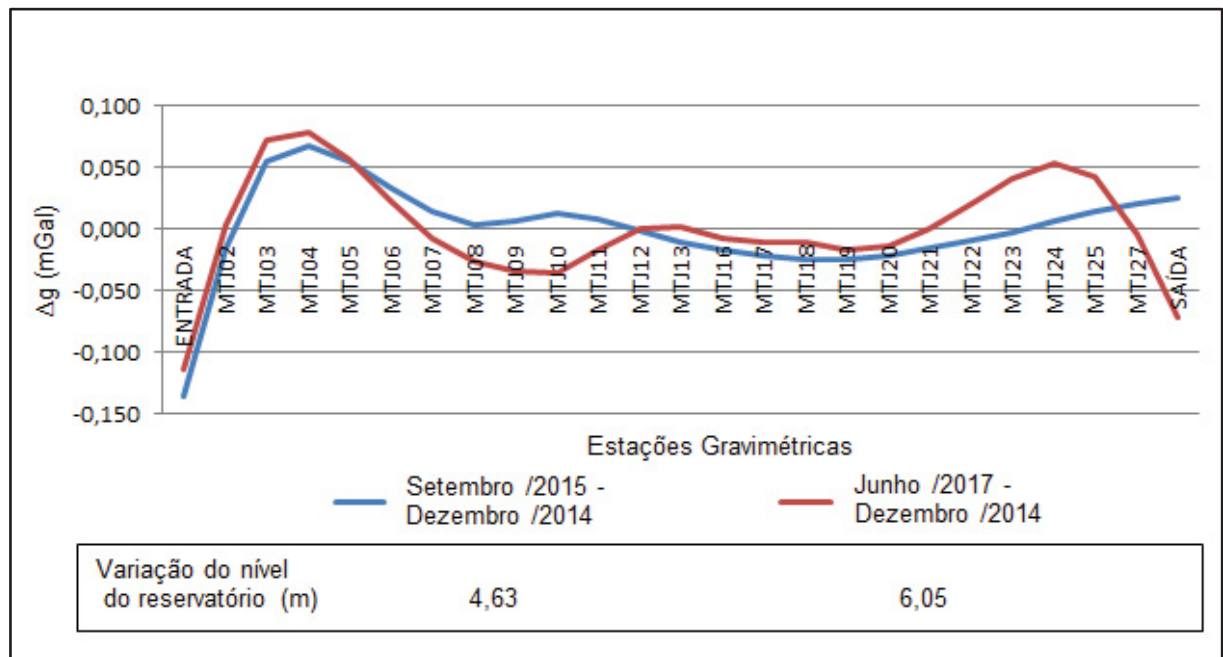
O alto gravimétrico na região NE pode refletir o CCR menos saturado, ou mesmo estar associado a uma maior espessura de soleira (sill) de diabásio situado no maciço rochoso da fundação da barragem, ou ainda, associado aos diques de diabásio (densidade média de $2,78 \text{ g/cm}^3$) que são comuns em toda a área de estudo (CASTRO, FERREIRA e ANGULO, 2008).

5.4.1 Variação de anomalia residual nas galerias

Anomalias residuais sofrem variações em relação a uma época de referência em decorrência, principalmente, de alterações no volume de água armazenada no reservatório da usina.

Assim, os perfis apresentados nas figuras 41 e 42 foram traçados para avaliar a existência de correlação entre anomalia residual e o nível do reservatório na barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá (dezembro/14 – 628,95m; setembro/15 – 633,58m e junho/17 – 635m).

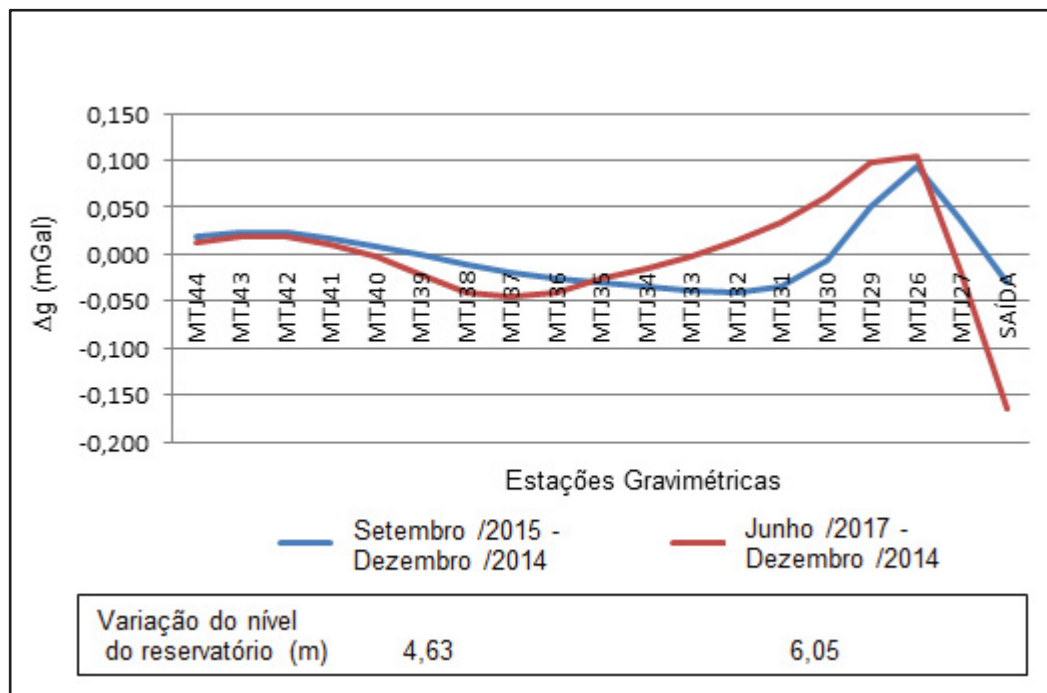
FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA ANOMALIA RESIDUAL COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIONA GALERIA SUPERIOR



FONTE: O AUTOR, (2018)

Observando a figura 41 pode-se afirmar para o período em análise, que a amplitude de variação da anomalia residual é cerca de 0,214 mGal. Entretanto, entre dezembro de 2014 e setembro de 2015, o nível do reservatório aumentou 4,63 m ocasionando variação máxima da anomalia residual igual a 0,067mGal. Do mesmo modo, entre dezembro 2014 e Junho de 2017, o nível do reservatório aumentou 6,05 m ocasionando variação máxima da anomalia residual igual a 0,078 mGal. A variação entre os máximos (0,011mGal) corresponde a uma variação de gravidade em pontos separados por uma altura de 3,6 cm utilizando-se o valor médio do gradiente normal da gravidade igual a 0,3086 mGal/m.

FIGURA 42 - VARIAÇÃO DA ANOMALIA RESIDUAL COM O NÍVEL DO RESERVATÓRIO NA GALERIA INFERIOR



FONTE: O AUTOR, (2018)

De modo similar se analisa a figura 42, onde a amplitude de variação da anomalia residual é cerca de 0,269 mGal. Entre dezembro de 2014 e setembro de 2015, o nível do reservatório aumentou 4,63 m ocasionando variação máxima da anomalia residual igual a 0,094mGal. E, entre dezembro 2014 e Junho de 2017, o nível do reservatório aumentou 6,05 m ocasionando variação máxima da anomalia residual igual a 0,104 mGal. A variação entre os máximos (0,010mGal) corresponde a uma variação de gravidade em pontos separados por uma altura de 3,2 cm utilizando-se o valor médio do gradiente normal da gravidade igual a 0,3086 mGal/m.

5.5 CAMINHAMENTO ELÉTRICO – MODELO DE PROFUNDIDADE

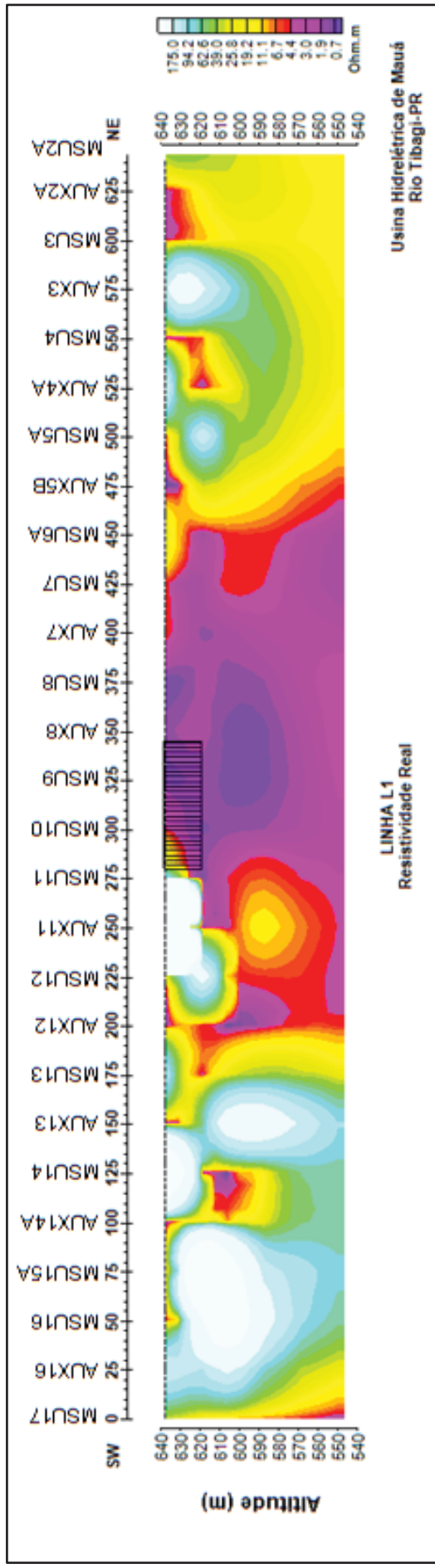
De modo geral, o modelo representado pela figura 43 destaca três grandes regiões em termos de valores de resistividade real, nomeadamente, região de alta resistividade entre as estações AUX12 e MSU17 na região SW, região de baixa resistividade entre as estações AUX5B e AUX12 (região central) e região de alta resistividade com tendência para intermediária entre as estações MSU2A e AUX5B na região NE. Contudo, a camada superficial apresenta alta resistividade, que pode

ser interpretado e correlacionado com a densidade do Concreto Compactado com Rolo (CCR) menos saturado. Nesta mesma camada, se observam alguns núcleos de baixa resistividade com maior ênfase na região central, onde se localizam o vertedouro (aproximadamente entre as estações MSU11 e AUX8) e Pequena Central Hidrelétrica – PCH (ao redor da estação AUX7). A baixa resistividade nesta região é interpretada como anomalias, de baixas densidades, associadas ao maior acúmulo e fluxo de água que provoca saturação no concreto.

A camada superficial apresenta também algumas áreas de baixas resistividades e com menores extensões, localizadas nomeadamente na região SW entre as estações MSU16 e AUX14A, sobre a estação AUX13 e entre as estações AUX12 e MSU12, com profundidades em torno de 10 metros. Ainda na região SW é possível observar uma área maior, de baixa resistividade, entre as estações AUX14A e MSU14 que inicia a altitude de 620 m (profundidade de 20 m em relação à crista) e termina a altitude de 590 m (profundidade de 50 m em relação à crista).

Estas áreas podem ser interpretadas como anomalias, de baixas densidades resultantes de saturação devido a pequenas infiltrações de água no CCR.

FIGURA 43 - MODELO DE PROFUNDIDADE DA RESISTIVIDADE



FONTE: O AUTOR, (2018)

Observação: As localizações das estações MSUs e AUXs sobre a barragem podem ser vistas na figura 25.

Na região NE, a camada superficial apresenta áreas de baixas resistividades em torno das estações AUX5B e MSU5A com profundidade próxima de 10 metros e em torno das estações MSU3 e AUX2A com profundidade próxima de 20 metros. Estas duas áreas apresentam cerca de 25 metros de extensão. Na mesma região se observa mais uma área também com extensão de 25 metros e profundidade em torno de 30 metros.

A tendência decrescente da resistividade na região NE, entre as estações MSU2A e AUX5B pode ser interpretada como anomalia, com tendência a baixa densidade, influenciada devido à presença de águano túnel de desvio. Outras áreas na mesma região podem ser interpretadas como anomalias, de baixas densidades resultantes de saturação devido a pequenas infiltrações de água no CCR.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Realizaram-se densificações das estações na crista e nos degraus a jusante da barragem com espaçamento de aproximadamente 10m e em regiões onde havia a maior probabilidade de ocorrência de variação de densidade devido à infiltração ou saturação do CCR, como por exemplo, junto a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) onde o espaçamento entre as estações foi de 1m. Avaliando o resultado obtido com os dois espaçamentos percebe-se que não houve ganhos significativos.

A partir dos levantamentos gravimétricos realizados nas galerias de inspeção superior e inferior, onde as estações gravimétricas coincidem com os pontos de observação topográfica, ou seja, nas junções de blocos, constatou-se ocorrência de alto e baixo gravimétrico nas regiões coincidentes com as obtidas na crista e a jusante da barragem, fato que reforça a possibilidade de terem sido originadas pelas mesmas fontes.

Buscando associar o levantamento gravimétrico com a rede geodésica de referência, as coordenadas geodésicas obtidas através do receptor GNSS utilizando a técnica RTK foram transformadas para o sistema da barragem. A partir destas, a relação e interpretação das anomalias da gravidade na crista, a jusante e nas galerias de inspeção da barragem mostraram-se eficazes.

O processamento dos dados e representação das anomalias da gravidade através de mapas e perfis mostrou coerência nos resultados.

A variação do nível do reservatório influencia o comportamento do valor da gravidade. Assim, a diminuição do valor da variação da gravidade está relacionada com massa atrativa menor decorrente do rebaixamento do nível de água e da profundidade da lâmina d'água.

Os resultados do levantamento de eletro-resistividade mostram coerência quando comparados aos resultados do levantamento gravimétrico. Um ganho adicional no método de eletro-resistividade está associado com os limites da extensão e profundidade das anomalias, que ficam melhores definidos.

Os resultados desta pesquisa mostram por outro lado que, anomalias da gravidade podem detectar variações na densidade do Concreto Compactado com Rolo (CCR) decorrentes da saturação do mesmo.

Anomalias negativas na região NE podem ser interpretadas como baixa densidade influenciada pela infiltração de água no CCR e também pela presença de água no túnel de desvio, apesar da obstrução deste, executada para a formação do reservatório.

Na região central, os baixos gravimétricos são interpretados como baixas densidades e devem refletir principalmente a presença de água no vertedouro e, secundariamente, o concreto saturado.

Anomalias negativas na região SW podem estar associadas a pequenas infiltrações d'água e saturação do Concreto Compactado com Rolo.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Em trabalhos similares envolvendo a gravimetria recomenda-se a combinação com outros métodos (por exemplo, elétricos) que permitam estimar com maior precisão a extensão e profundidade de anomalias.

Continuar com a pesquisa para relacionar a variação do volume do reservatório e a variação do gradiente vertical da gravidade e suas influência nas determinações gravimétricas.

REFERÊNCIAS

ANDRIOLO, F. R. **The Use of Roller Compacted Concrete**. São Paulo: Oficina de Textos, 1989.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Manual do Empreendedor. Volume II. Guia de Orientação e Formulários para Inspeção de Segurança de Barragens**. Brasília, 2015.

ASFAHANI, J.; TLAS, M. **Estimation of Gravity Parameters Related to Simple Geometrical Structures by Developing an Approach Based on Deconvolution and Linear Optimization Techniques**. Pure and Applied Geophysics, 172, pp 2891-2899, 2015.

BARLIK, M., OLSZAK, T., PACHUTA, A. **Ten Years of gravimetric monitoring on the points of geodynamic networks in the Sudety Mts**. Acta Geodyn. Gemeter. Vol.1, Nº 3 (135) 91-95, 2004.

BARLTHELMES, F. **Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models**. Scientific Technical Report STR09/02. Revised Edition, January 2013.

BATISTA, E. L.; GRAÇA, N. G; FARIAS, L. A; BITTENCOURT, R. M.. - **Porosity studies for roller compactec concrete = roller compactec concrete dams**, - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (Rcc) Dams. 2003 – MADRID.

BORTOLIN, J. R. M. **Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade**. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro. 2009.

BOLKAS, D.; FOTOPOULOS, G.; BRAUN, A. **On the impact of airborne gravity data to fused gravity field models**. Journal of Geodesy, 90, pp 561-571, 2016.

BRAGA, A.C.O. **Métodos Geométricos Aplicados** – Módulo Hidrogeologia, Material Didático. 2002. www.rc.unesp.br/ ou acobraga@rc.unesp.br. Acessado em 30/11/2017.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos. 160p, 2016.

BRAITENBERG, C.; SAMPIETRO, D.; PIVETTA, T.; ZULIANI, D.; BARBAGALLO, A.; FABRIS, P.; ROSSI, L.; FABBRI, J.; HAMDY MANSI, A. **Gravity for Detecting Caves: Airborne and Terrestrial Simulations Based on a Comprehensive Karstic Cave Benchmark**. Pure and Applied Geophysics, 173, pp 1243-1264, 2016.

BRIGGS, I. C., **Machine Contouring Using Minimum Curvature**: Geophysics, 39, p. 39-48, 1974.

BRITANITE disponível em <http://www.integracenter.com.br/portfolio/britanite/densidade.html> e acessado em 06/10/2017.

CASACA, J., HENRIQUES, M. **The Geodetic Surveying Methods in Monitoring of Large Dams in Portugal**. FIG XXII International congress. Washington D.C. USA, 2002.

CASTRO, L. G.; FERREIRA, F. J. F.; ANGULO, R. J. **Modelo Gravimétrico-Magnético do Gráben de Paranaguá – PR, Brasil**. Revista Brasileira de Geofísica, 26(3): 273-292, 2008.

CHAVAN, A. R.; VALUNJKAR, S. S. **A Study of Instruments used for Dam Instrumentation in Gravity and Earthen Dams**. International journal of engineering and technical research (IJETR), v. 3, n. 5, pp 355-361, 2015.

CONSÓRCIO GUARANI. **Aquífero Guarani. Técnicas Geofísicas Terrestres Aplicáveis ao Estudo do SAG e Guia Básico de Dados Regionais**. Série Manuais e Documentos técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. TDA comunicação, 2009.

COPEL disponível em <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=62750&tit=Construcao-da-Usina-Hidreletrica-de-Maua-entra-na-fase-de-finalizacao> e acessado em 07/03/2018.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas: Estudo de caso: UHE de Mauá.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 145p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DENTITH, M., MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**, 454p, 2014.

DEPARTMENT OF ARMY – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, Manual 1110-1-1004. **Deformation monitoring and control surveying**, Washington, DC, 1994.

DOGAN, U.; ERGINTAV, S.; ARSLAN, G.; DEMIR, D.; KARABOCE, B.; BILGIC, E.; SADIKOGLU, E.; DIRENC, A. **Establishment of a gravity calibration baseline with the constrain of absolute gravity measurements after 17 August 1999 Izmit earthquake in Marmara region, Turkey.** Acta Geodaetica et Geophysica, V. 48, pp 377-388, 2013.

DREWES, H. **Gravimetria para Sistemas Verticales de Referencia.** Escuela SIRGAS en Sistemas Verticales de Referencia. Curitiba, Brasil, Mayo 18 – 20, 2015.

DUARTE, J. M. G.; MORAES R. B.; OLIVEIRA, C. A.; CARDOSO, R. M. **Alguns Aspectos Geotécnicos Peculiares do Projeto da UHE Mauá.** Geosul, 2010.

FERREIRA, F. J. F. **Polarização Induzida Espectral na Exploração Mineral: Princípios e aplicações.** Geofísica Exploratória. Nota de aula. Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada. Universidade Federal do Paraná. 2009.

FIGUEIRA, I. F. R.; RIVAS, R. S. Z. ; SOARES, M. A. **Geological mapping and foundation geomechanics characterization for the identification places for detailed monitoring in plants maintenance.** In: Second International Dam World Conference, 2015, Lisboa. Second International Dam World Conference - Proceedings. LISBOA: LNEC, 2015. v. 01. p. 669-676.

FRIES, M.; FILHO, W. M.; MORALES, N.; e DOURADO, J.C. **Levantamento Gravimétrico na Região de Franca - SP e Delfinópolis - MG, no Reconhecimento e Delimitação de Feições Estruturais (Zonas de Sutura).** Revista do Instituto de Geociências - USP. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 7, n. 2, p. 81-93, outubro 2007.

FUKUDA, Y. **Monitoring Groundwater Variations Using Precise Gravimetry on Land and from Space**. GroundwaterandSubsurfaceEnvironments. pp 85-112, 2011.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba, Editora da UFPR, 2012.

GEMAEL, C.; FAGGION, P. **Auscultação geodésica na região da Hidrelétrica Segredo (II)**. 4º Congresso internacional da SBGf. Rio de Janeiro, 1995.

GENTILE, G. **Study, Preparation and Placement of Low Cement Concrete with Special Regards to Its Use in Solid Gravity Dams**. VIII International Congress on Large Dams, Edinburgh, 1964.

GLEGOLA, M.; DITMAR P.; VOSSEPOEL, F.; ARTS, R.; AL-KINDY, F.; KLEES, R.; **Gravimetric monitoring of the first field-wide steam injection in a fractured carbonate field in Oman – a feasibility study**. GeophysicalProspecting. V 63, pp 1256 – 1271, 2015.

GRANEMANN, D.C. **Estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas: Estudo de caso na usina hidrelétrica de salto Caxias**.Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 112p, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GRAÇA, N. L. S. S. **Validação da Determinação de Deslocamentos Relativos em Obras de Engenharia Obtidos com Técnica Geodésica e Medidores Triortogonais de Juntas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

HANSEN, K. D; REINHARDT, W. C. **RollerCompacted Concrete Dams**. New York: McGraw-Hill, 1991.

HINDERER, J.; CALVO, M.; ABDELFTTAH, Y.; HECTOR, B.; RICCARDI, U.; FERHAT, G.; BERNARD, J. D. **Monitoring of a Geothermal Reservoir by Hybrid Gravimetry; Feasibility Study Applied to the Soultz-Sous-Forêt and Rittershoffen Sites in the Rhine Graben**. Geothermal Energy, p. 1 – 19, 2015.

HIRT, C.; REXER M.; SCHEINERT, M.; PAIL, R.; CLAESSENS, S.; HOLMES, S.; **A new degree-2190 (10 km resolution) gravity field model for Antarctica**

developed from GRACE, GOCE and Bedmap2 data. Journal of Geodesy.V 90, pp 105 – 127, 2016.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy.**Springer Wien New York. 2005.

ICOLD.**Stateof the art of roller compacted concrete dams.** International commission on large dams, 1979.

ISLES, D. J.; RANKIN, LEIGH R. **Geological Interpretation of Aeromagnetic Data.**The Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013.

JIN, S.; FENG G. **Global Groundwater Cycles and Extreme Events Responses Observed by Satellite Gravimetry.**Gravity, Geoid and Height Systems.V 141.International Association of Geodesy Symposia, pp 283 – 288, 2014.

KABIRZADEH, H.; KIM, J. W; SIDERIS, M. G.**Micro-Gravimetric Monitoring of Geological CO₂ Reservoirs.** License <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> 2016.

KARAMAN, A.; SEYHAN, T.; ISIK, M. **Detecting the footprint of a longwall mine panel claimed to infringe on a permit boundary at the Soma–Darkale coalfield (Manisa, Turkey) using surface fractures and microgravity measurements.** Environmental Earth Sciences, 70, pp 1895-1902, 2013.

KASCH, N.; NAUJOKS, M.; KLEY, J.; JAHR, T. **Combined geological and gravimetric mapping and modellingfor an improved understanding of observed high-resolution gravity variations: a case study for the Global Geodynamics Project (GGP) station Moxa, Germany.**International Journal of Earth Sciences, pp 1257 – 1270, 2013.

KEAREY, P.;BROOKS, M.; IAN, H.**Geofísica de Exploração.**Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. – São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KERSTEN, T.; KOBE, M.; GABRIEL, G.; TIMMEN, L.; SCHON, S.; VOGEL, D.**Geodetic Monitoring of Subrosion-Induced Subsidence Processes In Urban Areas.** DE GRUYTER. J. Appl. Geodesy 2017; 11(1): 21 – 29.

KNODEL, K. LANGE, G. VOIGT, H. J. **Environmental Geology**. Handbook of Field Methods and Case Studies. 1358p, Springer, 2007.

KOUMETIO, F.; NJOMO, D.; TATCHUM, C. N.; TOKAM, A. P. K.; TABOD, C. T.; DICOUM, E. M. **Interpretation of Gravity Anomalies by Multi-Scale Evaluation of Maxima of Gradients and 3D Modelling in Bipindi Region (South-West Cameroon)**. International Journal of Geosciences, 2014.

KUPERMAN, S.C. **Barragens Brasileiras de Concreto Compactado com Rolo - Passado, Presente e Futuro**. II Simpósio Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba, 1996.

LACERDA, D; CABRAL, D; MATHIAS, H; LEMOS, M; RIVELINO, R. **Fatores que determinaram o CCR – Concreto compactado com rolo como material para o projeto estrutural da Barragem do AHE Peixe Angelical**. Trabalho final de graduação, Universidade católica de Goiás, 2006.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge University Press, New York. 2007.

MARQUES FILHO, J. **Maciços Experimentais de Laboratório de Concreto Compactado com Rolo aplicado às Barragens**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MARQUES FILHO, J; MARINO, M.A; GABINO, A.S.G; KIDO, A.T. **Parâmetros necessários ao projeto de barragens de CCR – Barragem de Derivação do Jordão como exemplo**. II Simpósio nacional de concreto compactado com rolo, Curitiba, 1996.

MILSOM, J. **Field Geophysics**. The Geological Field Guide Series. Wiley, 3ª edição, 2003.

MORITZ, H. **Geodetic Reference System 1980**. Bulletin Géodésique, Vol. 58, pp.388-398, 1984.

MUGUIO, M. R.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K. ; NADAL, C. A.; CRUZ, W.; SOARES, M. A.; FIGUEIRA, I. F. R.. **Implementation and analysis of GNSS**

station for continuous monitoring of the hydropower plant of Mauá. Espaço Energia, v. 10, p. 56-61, 2015.

NABIGHIAN, M. N., ANDER, M. E., GRAUCH, V. J. S., HANSEN, R. O., LAFEHR, T. R., LI, Y., PEARSON, W. C., PEIRCE, J. W., PHILLIPS, J. D., RUDER, M. E.. **Historical Development of the Gravity Method in Exploration.**Society of Exploration Geophysicists, 2005.

NISHIJIMA, J., SAIBI, H., SOFYAN, Y., SHIMOSE, S., FUJIMITSU, Y., EHARA, S., TANIGUCHI, M. **Reservoir monitoring using hybrid micro-gravity measurement in the Takigami Geothermal Field**, Central Kyushu, Japan.In Proceedings World GeothermalCongress, Bali, Indonesia. 25-29 April 2010.

OLIVEIRA, L.F.P; MUSSI, J.M.P; MOSER, D.E. **Desenvolvimento do método executivo de concreto compactado com rolo – A experiência da COPEL.** XVIII Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, Curitiba, 2005.

PATERSON, N. R. e REEVES, C. V. **Applications of Gravity and Magnetic Surveys.**Society of Exploration Geophysicists, 1985.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.**Bonding Roller Compacted Concrete Layers.** Concrete Information. Skokie, USA: Portland Cement Association, 1987.

REEVES, C. **Aeromagnetic Surveys.**Principles, Practice & Interpretation.Geosoft 2005.

RESENDE, F.D. **Concretocompactado com rolo – Melhores práticas.** Construtora Norberto Odebrecht SA, 2005.

SILVA, R. N. F.. **Avaliação do método de nivelamento, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: Estudo de caso para a UHE de Mauá.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, 2012.

SCINTREX.**Operation Manual.**CG-5 Scintrex Autograv System. Scintrex Limited, Canadá, 2006.

SOFYAN, Y.; NISHIJIMA, J.; FUJIMITSU, Y.; FUKUDA, Y.; TANIGUCHI, M.; & DAUD, Y. **Hybrid Gravimetry for Optimization Time Lapse Monitoring Data: A**

case study in Kamojang Geothermal Field. In Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

TIMMEN, L. **Absolute and Relative Gravimetry.** Sciences of Geodesy - I, pp 1-48 Junho 2010.

TORGE, W. **Gravimetry.** Walter de Gruyter: Berlin and New Work. 465p. 1989.

TORGE, W. **Geodesy.** Walter de Gruyter: Berlin and New Work. 264p. 1991.

TORRES, J. L. P. **Conceptualización, Caracterización e Interpretación de la Variabilidad Espacio-Temporal de la Hidrogeología del Karst por Modelado Inverso.** Grupo de Geofísica del IGME. Tres Cantos. Marzo 2013.

TOURIST, disponível em <http://www.touristlink.com.br/Estados-Unidos/barragem-de-willow-creek/overview.html> acessado em 07/03/2018.

VANICEK, P.; KRAKIWSKI, E. **Geodesy:theconcepts.** North HollandPublishingCo. 1982.

WENDLER, A. P. **Estudo Experimental do Concreto Compactado a Rolo Enriquecido com Calda de Cimento para Face de Barragens de Concreto.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba,2010.

ZANETTI, M. A. Z.**Implicações Atuais no Relacionamento entre Sistemas Terrestres de Referência de Origem Local e Geocêntrica.**Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2006.